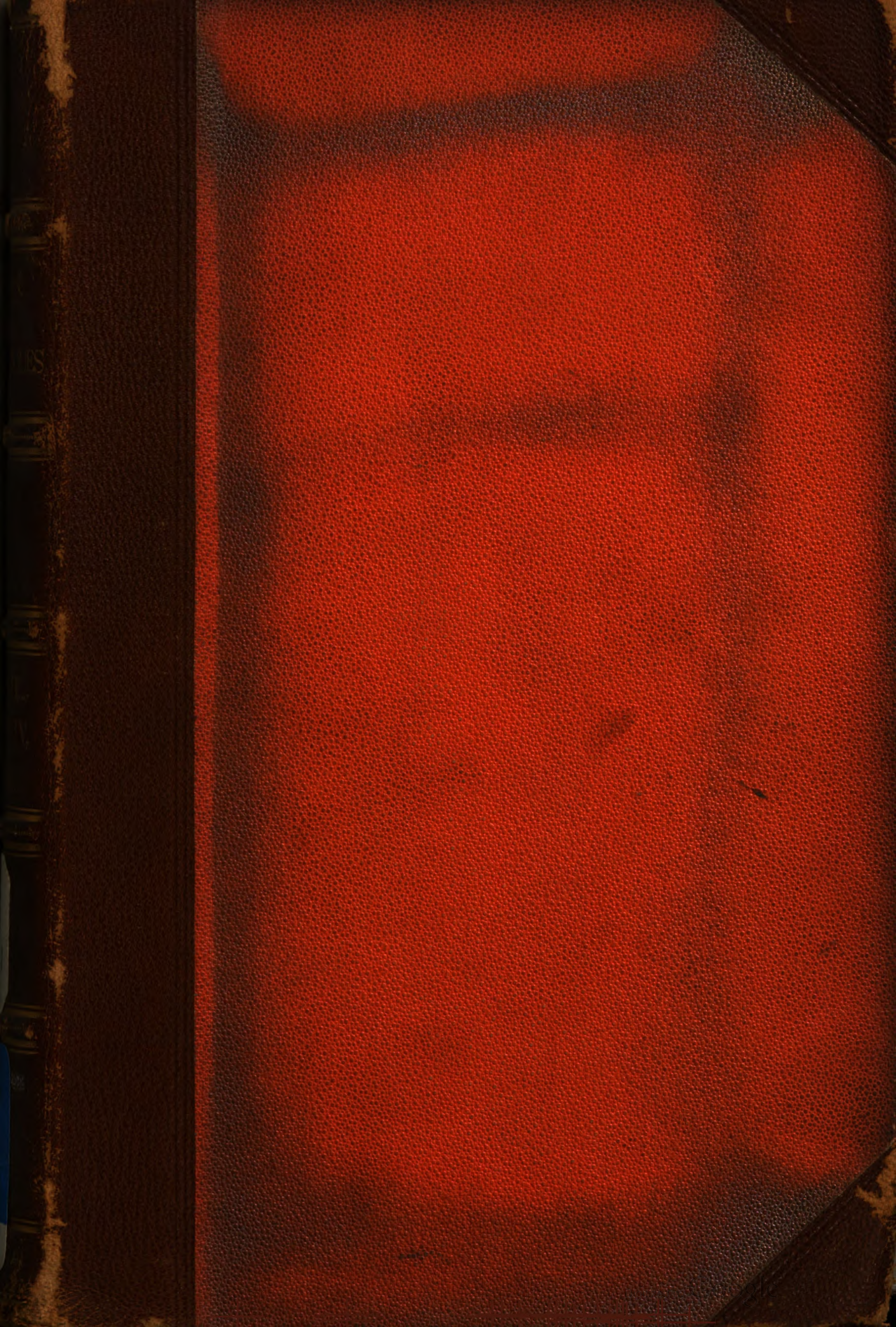
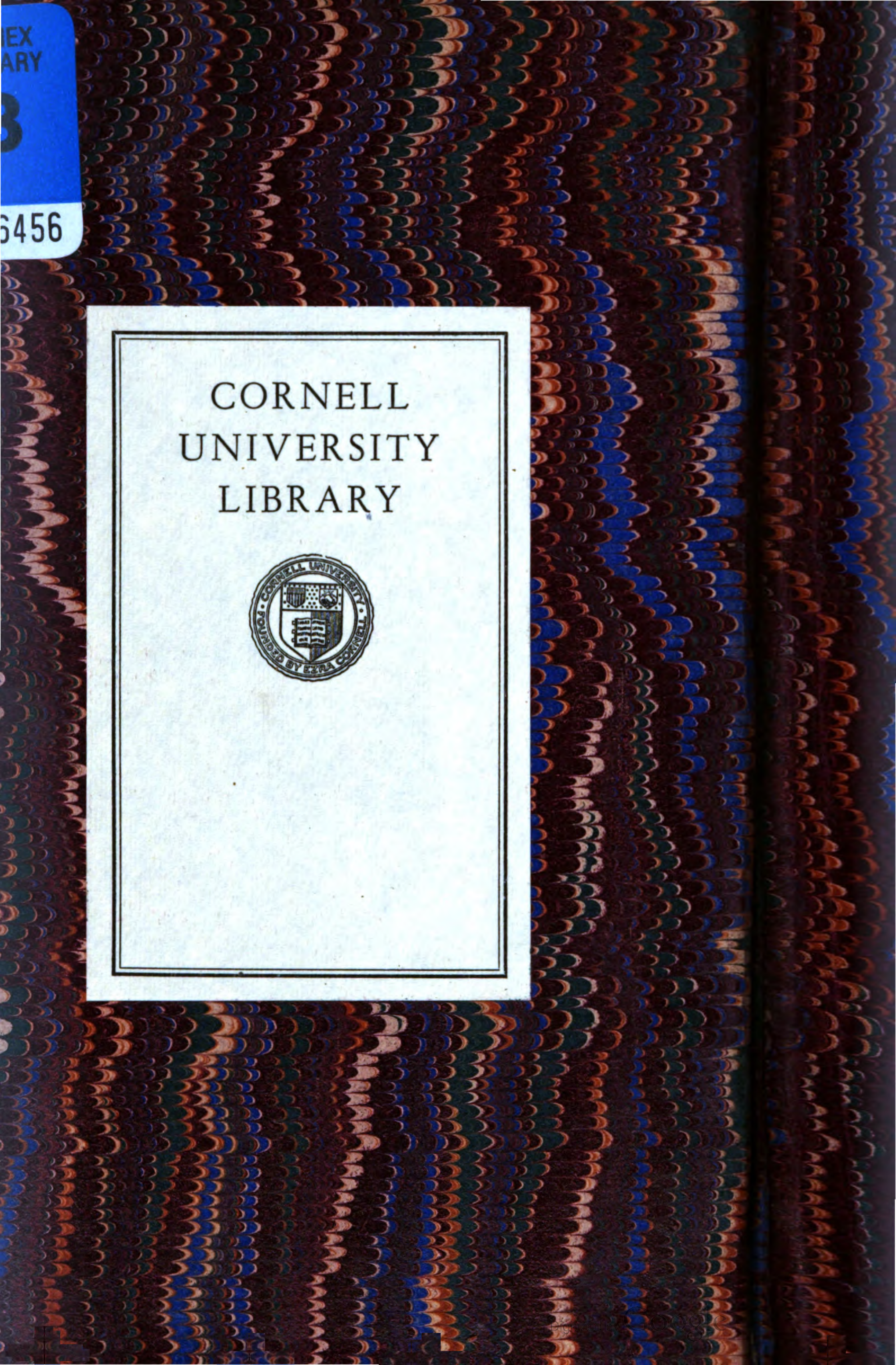
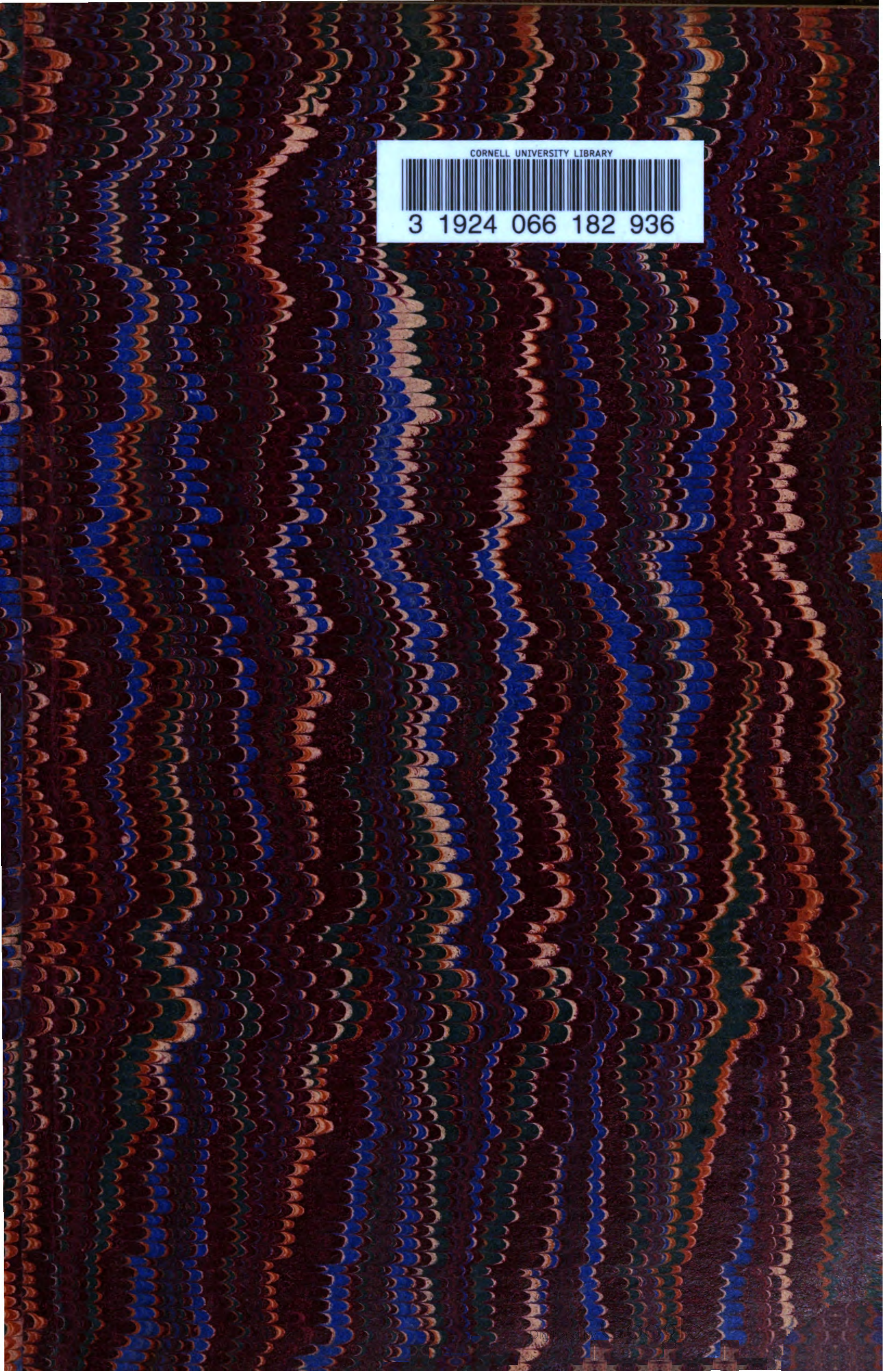



CORNELL
UNIVERSITY
LIBRARY
CORNELL UNIVERSITY
FOUNDED BY EZRA CORNELL


CORNELL UNIVERSITY LIBRARY
3 1924 066 182 936

ANNALES

TÉLÉGRAPHIQUES

IMPRIMERIE E. FLAMMARION, 26, RUE RACINE, PARIS.

ANNALES
TÉLÉGRAPHIQUES

TROISIÈME SÉRIE

—

TOME VINGT-QUATRIÈME

PARIS

P. VICQ-DUNOD ET Cie, ÉDITEURS

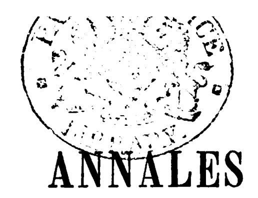
LIBRAIRES DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES
ET DES TÉLÉGRAPHES

49, Quai des Grands-Augustins, 49

—

1898


PATENT OFFICE
LIBRARY.



ANNALES
TÉLÉGRAPHIQUES

Année 1898 Janvier-Février

ÉTUDE

SUR LES PARATONNERRES TÉLÉGRAPHIQUES

Ce travail fait suite à ceux qui ont été effectués sur le même sujet par M. Lagarde, puis par M. Massin et dont le compte rendu a été publié dans les *Annales* de 1887, 1889 et 1893.

M. Massin a comparé l'efficacité de divers protecteurs connus en les rapportant à un paratonnerre à lame d'air d'épaisseur réglable. D'une manière générale, il résulte de ses expériences que la plupart des appareils en usage présentent une efficacité différente, mais *du même ordre de grandeur*, les plus sensibles étant, évidemment, ceux dans lesquels les pointes ou plaques sont extrêmement voisines. Un paratonnerre dont les plaques métalliques sont séparés par une feuille isolante (mica, gutta-percha, papier, etc.) est équivalent à un appareil à lame d'air de même forme dans lequel les plaques sont à une distance deux ou

trois fois plus grande. L'appareil le plus efficace est donc le dispositif à isolant d'air dont les armatures sont aussi voisines que possible. Or, dans la pratique, on est assez limité en ce qui concerne ce rapprochement : les paratonnerres doivent être à bon marché, leur construction ne peut présenter l'invariabilité d'appareil de précision ; si l'intervalle est étroit, les dilatations et contractions résultant des variations de température ou d'hygrométrie des pièces et supports peuvent amener les plaques au contact, soit d'une manière temporaire, soit d'une façon permanente ; le transport métallique provenant des décharges atmosphériques peut produire le même effet. La mise à terre intempestive et surtout intermittente jette toujours une facheuse perturbation dans l'exploitation des lignes. On est donc amené pratiquement à restreindre la sensibilité des protecteurs, surtout lorsqu'il s'agit de les installer loin du personnel de surveillance, dans les guérites de raccordement ou chez des abonnés, sans quoi les dérangements qu'ils occasionneraient seraient plus nuisibles que la détérioration des objets de matériel. Si l'on pouvait réaliser un dispositif formé de deux armatures plus éloignées que celles des paratonnerres actuels et jouissant d'une efficacité plus grande, on ferait faire un pas à la question pratique puisqu'on mettrait l'appareil à l'abri du déréglage et des dérangements causés par son fonctionnement. On avait pensé que ce résultat pourrait être atteint en enfermant un paratonnerre de forme appropriée, dans une ampoule dont l'air serait raréfié à un degré convenable et des recherches furent entreprises en vue de vérifier si cette prévision était fondée. Ces expériences ont été commencées par la méthode de M. Massin,

mais la forme des appareils à vide différant notablement de celle des paratonnerres ordinaires, des particularités furent remarquées au cours des opérations préliminaires. Elles conduisirent à procéder à un examen plus approfondi des divers éléments du problème. Avant de rendre compte des recherches effectués sur les appareils à vide, il paraît nécessaire d'analyser rapidement un important travail publié de 1888 à 1889 par M. Olivier Lodge, professeur à l'Université de Liverpool, et qui a donné lieu, en Angleterre, à une longue polémique sur la question des paratonnerres et d'une manière générale sur le mécanisme de la foudre. Les différents mémoires de l'auteur ont été réunis en un volume (Londres, 1892); les points essentiels de la controverse ont été reproduits en leur temps par *La Lumière électrique*.

Les travaux de ce savant n'ont peut-être pas reçu des télégraphistes l'accueil qu'ils méritaient, bien que la maison Muirhead ait construit, sur les indications de M. Lodge, un paratonnerre destiné aux câbles sous-marins, il ne semble pas, à notre connaissance du moins, que les conclusions de cet auteur aient donné lieu à un emploi un peu considérable des dispositifs basés sur sa théorie (*). Il convient de remarquer, en effet, que, dans la polémique soulevée par les diverses communications de M. Lodge, M. Preece s'est montré le principal adversaire de la théorie nouvelle. En particulier, il a affirmé que les paratonnerres en usage dans les télégraphes répondaient à toutes les exigences, qu'il résultait d'une statistique

(*) La société Westinghouse fait installer depuis un an, sur ses canalisations électriques aériennes, des appareils protecteurs basés sur la théorie de M. Lodge.

effectuée par l'office anglais en 1885 que sur 600 appareils de valeur (Wheatstone, Multiplex, etc.) aucun n'avait été endommagé par la foudre et qu'il en était de même de 117 câbles sous-marins appartenant à cette administration. Cette opinion a suffi pour que les paratonnerres préconisés par M. Lodge ne soient pas mis à l'essai en Angleterre.

L'affirmation de l'ingénieur en chef du *Post Office* est peut-être fondée en ce qui concerne la Grande-Bretagne, située sous un climat peu orageux, mais elle ne saurait être généralisée. Bien que le nombre d'appareils brûlés par la foudre ne soit pas très considérable en France, notre administration ne partage pas l'optimisme de l'office anglais et les recherches qu'elle prescrit à ce sujet en sont la preuve. Il est d'ailleurs reconnu que certaines lignes souterraines sont frappées par la foudre et il n'est pas démontré que les câbles sous-marins eux-mêmes soient à l'abri de toute atteinte. Mais, dans l'exposé de sa nouvelle théorie, M. Lodge semble attribuer une importance considérable, quoique non exclusive, à un effet particulier de l'électricité atmosphérique qui, pour être le plus destructeur d'une manière générale, n'est certainement pas celui qui nuit le plus à la télégraphie. Des travaux de M. Lodge et des expériences complémentaires que nous avons effectuées à ce sujet, il résulterait cette conséquence paradoxale, au premier abord, que les violents coups de foudre qui frappent les lignes troublent moins les transmissions et détériorent plus rarement les appareils télégraphiques que les manifestations orageuses moins intenses, mais d'un caractère plus continu, et qu'il est plus facile de se garder des premiers que des autres.

I

EXPOSÉ ET DISCUSSION DES TRAVAUX DE M. LODGE

1. *Obstruction présentée par les conducteurs au passage des courants alternatifs à haute fréquence.* — On sait que la décharge d'une bouteille de Leyde à travers un conducteur peut, suivant les éléments de ce conducteur, s'effectuer de deux manières différentes : ou elle donne lieu à un courant qui croit d'abord très rapidement, puis qui décroit indéfiniment ; ou bien elle produit une succession de courants alternatifs dont l'intensité diminue comme l'amplitude d'un pendule dans un milieu résistant et suivant une loi analogue (*).

D'autre part, le régime d'un courant variable dans un conducteur dépend :

1° D'un paramètre géométrique provenant de la forme de l'axe de ce conducteur ;

2° De la perméabilité magnétique du conducteur et du milieu séparant ses divers éléments ;

3° De la forme de la section droite du conducteur.

Dans la plupart des applications courantes, il n'est pas nécessaire de tenir compte du second ni du troisième élément, les choses se passent comme si le conducteur était réduit à son axe et il suffit du premier paramètre qui représente l'action des divers éléments longitudinaux les uns sur les autres : c'est le coeffi-

(*) R et L étant la résistance et la self-induction totales du circuit reliant les armatures d'un condensateur de capacité C, la décharge est continue si $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ et oscillatoire dans le cas contraire.

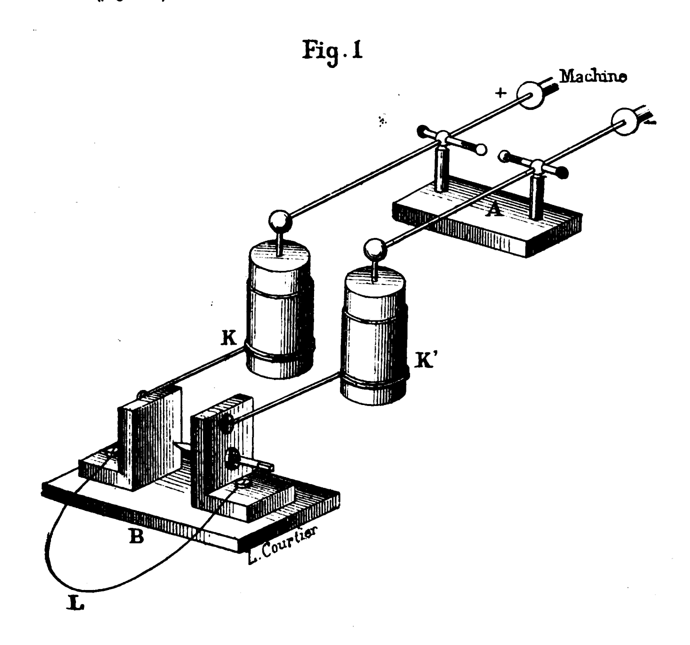
cient de self-induction avec son acception ordinaire. Avec les courants à alternances rapides, le dernier facteur n'est plus négligeable : les divers filets élémentaires, suivant lesquels on peut décomposer fictivement le conducteur, réagissent les uns sur les autres, *s'obstruent mutuellement*, et il en résulte, en définitive, que la densité du courant est moindre à la partie centrale qu'à la périphérie. Cette réaction dépend de la perméabilité du conducteur, de la forme de sa section et enfin de la fréquence. L'influence de la forme de la section n'est pas négligeable avec les courants alternatifs qu'emploie aujourd'hui l'industrie; elle est également appréciable sur les circuits téléphoniques, mais lorsqu'il s'agit d'alternances extrêmement rapides, comme celles qui résultent de la décharge oscillatoire des condensateurs, elle devient absolument prépondérante. Il en résulte que la propagation ne dépend plus que de la figure extérieure du conducteur, qu'elle s'effectue exclusivement par la couche superficielle, que la perméabilité propre n'intervient plus et que la conductibilité même disparaît devant l'influence de la forme extérieure.

2. *Application à la bouteille de Leyde. — Une décharge brusque franchit un court intervalle d'air plutôt que de vaincre l'obstruction d'un conducteur d'une certaine longueur.* — Ainsi, lorsqu'on décharge une bouteille de Leyde à travers un conducteur, même gros et court, l'obstruction qu'il présente, vu la haute fréquence du courant oscillatoire, peut être telle que la différence de potentiel à ses extrémités soit suffisante pour que la résistance de l'air soit vaincue et qu'une partie de la charge atteigne les corps voisins.

En particulier, si les deux extrémités du fil sont suffisamment rapprochées l'une de l'autre, une étincelle peut jaillir entre elles, malgré la haute conductibilité du métal qui les réunit.

M. Lodge a démontré qu'il en était bien ainsi par diverses expériences dont la plus curieuse est la suivante (*fig.* 1) :

Fig. 1



Les armatures internes de deux jarres sont reliées aux pôles d'une machine électrostatique. Les armatures extérieures reposent sur une table en bois et sont raccordées respectivement aux boules d'un déchargeur B, entre lesquelles on attache, en outre, un fil conducteur L. La machine fonctionnant, les armatures extérieures demeurent au potentiel zéro et le potentiel des armatures internes augmente en valeur

absolue, mais en sens contraire dans chacune d'elles ; il est par exemple positif sur la boule gauche et négatif sur la droite. Si les boules A de l'excitateur de la machine sont suffisamment rapprochées, il arrive un moment où la différence de potentiel de ces boules est suffisante pour qu'une étincelle jaillisse entre elles, les bouteilles se déchargent ; au moment où se produit ce phénomène, le potentiel des armatures extérieures est brusquement changé et une seconde décharge entre ces armatures est la conséquence de la première. Ces décharges, étant d'ailleurs oscillatoires, réagissent alternativement l'une sur l'autre et toute entrave apportée à la décharge B a sa répercussion en A. Il convient de remarquer que la décharge des armatures extérieures peut s'effectuer par trois voies : le support commun, isolant imparfait, l'intervalle d'air B et enfin le conducteur L.

D'abord, si les boules B sont très éloignées et si la longuer du fil L atteint quelques mètres, il ne se produit pas d'étincelle en B, la décharge en A est faible, pénible, comme fusante. Au fur et à mesure qu'on diminue la longueur du conducteur L, le volume de l'étincelle A augmente, ainsi que le bruit qu'elle produit. La présence de quelques mètres de fil a donc une influence très sensible sur le phénomène ; on peut d'ailleurs faire varier la nature et la section du conducteur, remplacer le fil de cuivre par un fil de fer sans modifier notablement le résultat ; la longueur et la forme géométrique sont les facteurs prépondérants.

Si, conservant un même fil, on rapproche les boules B, il arrive un instant où la décharge a lieu entre ces boules et cela malgré la dérivation offerte par le fil conducteur. Dans ce cas, les étincelles A et

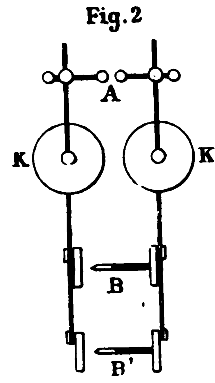
B sont plus volumineuses et plus bruyantes que précédemment.

Si l'on remplace l'excitateur B par un paratonnerre télégraphique d'un système quelconque, la décharge doit choisir entre cet appareil et le fil L. Or, celui-ci peut difficilement fournir un chemin suffisant pour éviter qu'une étincelle se produise au paratonnerre. *Ainsi un paratonnerre à lame d'air réglé à* $0^{mm},25$ *n'est pas protégé par un fil de cuivre de* 2 *millimètres de diamètre attaché entre ses bornes lorsque sa longueur excède* 14 *centimètres.*

Ce dernier exemple est très instructif, en ce qui concerne le but particulier de cette étude. Il montre combien il est difficile de comparer, par des expériences de laboratoire, l'efficacité de divers paratonnerres, puisqu'il suffit de modifier d'une très petite quantité la forme ou la longueur d'un fil de liaison pour faire varier le résultat obtenu. Il montre aussi qu'on peut difficilement songer à réaliser un paratonnerre à vide ou de tout autre système protégeant, *en toutes circonstances et d'une manière absolue*, les objets auxquels il sera adapté, puisqu'un fil de cuivre gros et court ne suffit pas pour assurer cette protection. Par contre, il semble indiquer qu'un appareil même médiocre peut, *au moins pour certaines décharges particulières*, fournir une protection suffisante s'il est judicieusement installé. A l'appui de cette manière de voir, on peut citer les expériences suivantes :

3. *Utilisation de l'obstruction présentée par les conducteurs pour la protection du matériel télégraphique contre les décharges brusques.* — Réglons les boules B (*fig.* 2) à une distance fixe, 2 centimètres par exemple,

et enlevons le fil L. Une décharge très bruyante se produit entre ces deux boules et si celles-ci appartenaient à un appareil télégraphique, cette décharge y causerait, sans aucun doute, d'importantes détériorations; il est non moins certain qu'on ne pourrait toucher les deux boules avec la main sans s'exposer à une dangereuse commotion.



Relions par deux conducteurs *très courts* ces deux boules à celles d'un excitateur semblable B'; la décharge se partage entre les deux appareils, et, si on les règle à la même distance, on obtient indifféremment dans l'un ou dans l'autre, et quelquefois dans les deux simultanément, des étincelles de même puissance et de même couleur : un fil fin établi entre les bornes est brûlé aussi bien sur un excitateur que sur l'autre.

Remplacons les conducteurs courts reliant B et B' par des fils d'une certaine longueur ou mieux encore par des fils isolés à la gutta-percha et enroulés sur des bobines. On obtient encore une étincelle en B', mais elle est très grêle et peu brillante, c'est plutôt un filament violet qu'une étincelle. On peut sans éprouver une secousse trop pénible toucher les deux bornes à la main; enfin, un fil métallique fin tendu entre ces deux bornes ne brûle plus, alors même que de très fortes étincelles éclatent en B.

Si on dispose un troisième excitateur B'', séparé du précédent par une autre paire de bobines, l'étincelle qu'on obtient dans ce troisième appareil est

encore plus faible que dans le second et manque même le plus souvent. Au lieu de prendre des excitateurs identiques, on peut choisir des modèles plus appropriés aux circonstances : le premier, exposé à recevoir une forte décharge, étant, par exemple, formé de deux grosses tiges séparées par un intervalle d'air de 2 ou 3 millimètres ; le second, de deux pointes écartées de moins de 1 millimètre et le dernier de pointes soigneusement ajustées à quelques centièmes de millimètre. Pour la même raison, on constituera la première paire de bobines avec quelques mètres de fil de cuivre un peu gros, recouvert d'une couche épaisse de gutta-percha, parce qu'il sera exposé à recevoir la secousse d'une forte décharge qui pourrait sans ces précautions sauter d'une borne à l'autre en détériorant le conducteur ou l'isolant ; la dernière paire de bobines sera en fil fin et recouverte d'un isolant moins épais ; les paires intermédiaires avec des éléments appropriés à la décharge qu'elles devront supporter.

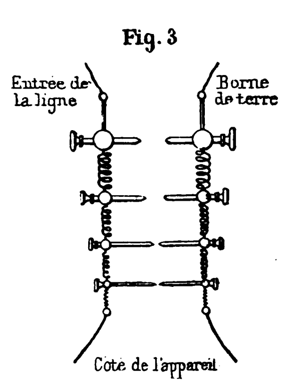
4. *Paratonnerre Lodge pour appareils télégraphiques.* — Dans ces conditions, le système peut atteindre le degré d'efficacité que l'on désire tout en demeurant robuste.

M. Lodge suppose que la première bobine ne laissant passer, par exemple, que la millième partie de la décharge, la paire suivante peut arrêter le résidu dans la même proportion, et de même les suivantes. Avec trois paires de bobines, il n'arriverait plus au quatrième paratonnerre que la billionième partie de la charge totale. En donnant ces nombres, l'auteur n'a sans doute voulu que mieux faire comprendre son rai-

sonnement; il n'a fait, au sujet de ce partage, aucune détermination quantitative et il semble, en effet, que le phénomène se prête peu à des mesures. Les groupes protecteurs ne peuvent avoir un coefficient d'efficacité que pour une valeur donnée de la fréquence et en supposant qu'aucune condition ne change au cours même de la décharge; pour que plusieurs groupes consécutifs aient le même coefficient d'efficacité, il faudrait qu'il existât entre les éléments de leur construction des relations qui n'existent probablement pas avec les écartements indiqués par M. Lodge ou avec ceux que la pratique permettrait de réaliser. Quoi qu'il en soit, l'efficacité du dispositif n'est pas douteuse et au moyen des intervalles correspondant à 3 millim., $0^{mm},6$ et $0^{mm},1$ on peut, sans être incommodé, toucher les bornes du dernier appareil avec les doigts mouillés pendant que les plus bruyantes décharges éclatent entre les armatures du premier.

Tel est le principe du paratonnerre qu'a fait breveter M. Lodge et qu'a construit la maison Muirhead (*fig.* 3). Il convient de remarquer que cet appareil est symétrique, c'est-à-dire que la ligne et la terre y sont traitées de la même manière, une perturbation électrique pouvant, d'après l'auteur, atteindre les appareils aussi bien si elle provient d'une charge communiquée au fil que si elle résulte d'un contre-coup libérant une quantité d'électricité maintenue en un point du sol par un phénomène d'induction et s'échappant brusque-

Fig. 3



ment sur les conducteurs voisins, lorsque la cause inductive vient à disparaître.

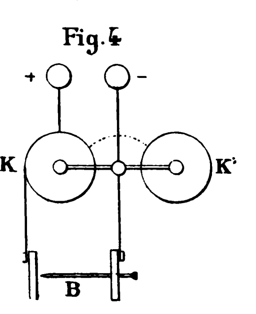
5. *Expériences de laboratoire imitant les effets de la foudre.* — Revenons à la disposition expérimentale indiquée plus haut (*fig.* 1 et 2) fournissant une décharge extrêmement brusque entre deux points. Elle permet de réaliser une expérience intéressante. Remplaçons l'excitateur B par deux plateaux métalliques dont l'un est fixe et dont l'autre sert de support à des pièces montées sur des tiges filetées qu'on peut amener plus ou moins près du plateau fixe; ces pièces étant, par exemple, une boule, un disque plan et une pointe fine. On constate que la décharge se produit avec la même facilité par l'un ou l'autre des trois systèmes s'ils sont placés à la même distance du plateau fixe; les pointes, dans ce cas, ne possèdent aucune propriété spéciale, l'épaisseur et la nature de la couche isolante jouent seuls un rôle efficace dans ces circonstances. On peut, au moyen de ce dispositif, trouver facilement à quelle épaisseur de couche d'air correspond une lame isolante déterminée. M. Lodge, auquel on doit cette expérience, lui a donné plusieurs formes très originales et très intéressantes au point de vue de la théorie de la protection des bâtiments. Il a placé les plateaux horizontalement et a disposé entre eux des sphères, des pointes, des flammes, de médiocres conducteurs, une pluie artificielle, etc..., le résultat obtenu a été semblable au précédent; la forme et la conductibilité de l'objet dirigé vers le plateau fixe n'influent pas sur la décharge, la distance de son extrémité libre à ce même plateau détermine seule le trajet de l'étincelle qui choisit le chemin le plus court.

Pour que la combinaison d'armatures et de bobines dont il vient d'être question ait réellement l'efficacité que les expériences qui précèdent sembleraient indiquer, *il faudrait que les décharges orageuses fussent toujours semblables à celles de ces expériences.* Or, cela n'est nullement certain. M. Lodge a lui-même montré qu'on pouvait réaliser dans les laboratoires des décharges produisant des effets différents des précédents et il est probable qu'ils aient leur correspondant dans la nature.

Dans l'installation indiquée plus haut, l'étincelle sur laquelle on expérimente se produit très brusquement; c'est le contre-coup d'un autre phénomène semblable *au choc en retour* des anciens physiciens. Or, la décharge peut se produire d'une manière moins brusque après avoir été préparée par une série de phénomènes continus.

6. *Décharge préparée par induction électrique. Action des pointes.* — Lorsqu'une machine statique reliée à une batterie de Leyde est mise en marche, elle fonctionne d'abord silencieusement, puis, le potentiel croissant, toutes les parties saillantes du conducteur et même simplement les endroits recouverts de poussière deviennent le siège de petites lueurs représentant autant de fuites ou de décharges s'effectuant sur les corps voisins, par l'intermédiaire des particules suspendues dans l'atmosphère. Si l'intervalle entre les deux boules de l'excitateur n'est pas considérable, une décharge bruyante se produit encore, mais si cet intervalle est un peu grand ou si le conducteur est dépourvu d'aspérités, aucune décharge n'a lieu; la machine débitant toujours, le potentiel de

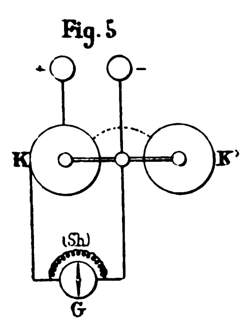
la batterie n'augmente plus. Quoi qu'il arrive, que l'excédant de charge s'échappe en aigrettes presque silencieuses ou qu'une décharge bruyante éclate, ces phénomènes se produisent dans un milieu modifié par une action préalable continue. Dans ces conditions, la forme des pièces en présence a une influence marquée sur la distance explosive et l'intensité de la décharge; la propriété des pointes, connue depuis l'origine des machines statiques, est manifeste dans ces circonstances. C'est cette forme de décharge que M. Lodge désigne sous le nom de *chemin préparé*. Il la réalise (*fig.* 4) en reliant chaque armature de la batterie à un pôle de la machine et en établissant le dispositif à étudier en dérivation entre ces armatures. Lorsque le potentiel atteint une valeur suffisante, une décharge se produit en B, mais l'intervalle d'air séparant ces armatures a été modifié pendant toute la durée de la charge. La préparation du chemin s'effectue encore de la même manière, quoique plus rapidement, lorsqu'au lieu de laisser la décharge se produire spontanément entre des électrodes mises en place à l'avance on la provoque au moyen d'un excitateur; ce dernier mode d'opérer se prête moins facilement aux mesures, car la distance explosive et la vitesse de rapprochement des boules dépendent du hasard de l'expérimentation.



En réalité, la décharge par le chemin préparé est toujours un effet complexe résultant de la superposition de deux phénomènes distincts, et M. Lodge n'a

peut-être pas insisté sur ce point autant qu'il était utile. Avant d'aller plus loin, il convient de montrer comment se comportent les paratonnerres en présence des courants continus produits par les machines statiques.

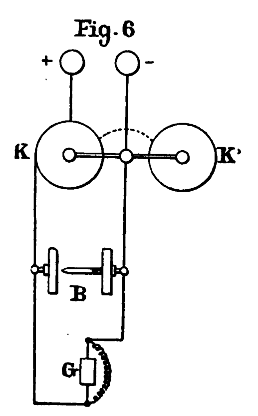
7. *Courants produits par les sources statiques.* — Prenons un galvanomètre qui, sans présenter une fragilité excessive, possède néanmoins une grande sensibilité. Relions-le aux deux pôles d'une machine statique (*fig.* 5) et mettons celle-ci en action, l'équipage du galvanomètre effectue aussitôt des oscillations rapides de part et d'autre d'une position qui n'est plus celle du zéro, les élongations sont irrégulières et il est difficile, même en prenant leur valeur moyenne, de faire des lectures de quelque précision. Les choses se passent tout différemment si l'on fait usage d'un appareil à grand amortissement : un galvanomètre Deprez et d'Arsonval, shunté par une très faible résistance est particulièrement propre à cet objet; le cadre prend une position bien fixe qui représente la moyenne des impulsions produite par le courant variable fourni par la machine.



M. Lodge, qui a employé un galvanomètre à équipage aimanté pourvu d'un miroir, semble avoir été fréquemment gêné par des soubresauts qu'on ne peut guère attribuer qu'à des attractions statiques, car on les rencontre également dans les fils de connexion. Le mode de suspension du cadre Deprez et d'Arsonval,

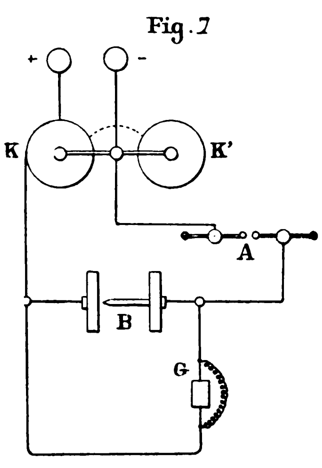
ainsi que le grand amortissement produit par le shunt, éliminent presque complètement ces perturbations.

Le courant ainsi produit est très faible : une machine de Wimshurst de grandeur moyenne ne fournit que quelques cent-millièmes d'ampère ; l'introduction d'une résistance importante (10.000 ohms) sur les fils conducteurs ne le diminue pas d'une manière appréciable, il en est de même d'une bobine de grande self-induction. On se trouve donc bien en présence d'un courant toujours de même sens et à peu près constant dans un circuit très résistant ; cette grande résistance provient de la couche d'air séparant les plateaux des collecteurs de la machine. Dans ces conditions, les bouteilles de Leyde ne prennent aucune charge sensible, tout au plus contribuent-elles à régulariser un peu le courant qui traverse le galvanomètre ; le débit de la machine est d'ailleurs très faible puisqu'elle n'agit pas comme multiplicateur dans ces conditions de fonctionnement.



8. *Superposition des deux modes de décharge.* — Le phénomène ne change pas si l'on place en dérivation, sur les conducteurs joignant la machine au galvanomètre, un paratonnerre à pointes ou à plaques (*fig.* 6) ; si mince que soit la lame isolante séparant les armatures de ce paratonnerre, elle ne modifie pas l'intensité du courant qui traverse l'appareil de mesure, mais si l'on amène les deux pièces au contact, le galvanomètre n'indique plus aucune trace de courant.

Si l'on intercale sur le parcours de l'un des fils aboutissant à la batterie un excitateur micrométrique A (*fig.* 7), les choses se passent tout différemment. A mesure que la machine fonctionne, la batterie se charge, jusqu'au moment où la différence de potentiel entre ses armatures atteignant la valeur correspondant à la distance qui sépare les boules de l'excitateur, une décharge se produit; cette décharge est d'autant plus nourrie que la capacité de la batterie est plus grande et que la distance des boules du micromètre est plus considérable.



Mais avant que cette étincelle se produise, on peut constater que le galvanomètre est encore traversé par un courant permanent, plus faible que dans le cas précédent, mais néanmoins très appréciable; ce courant provient d'une déperdition d'une boule à l'autre par les supports ou à travers l'air qui les sépare. Comme dans la dernière expérience, l'introduction de bobines de résistance ou de self-induction n'en modifie pas la valeur.

Au moment où l'étincelle éclate à l'excitateur, le galvanomètre reçoit un choc et l'on entend à l'intérieur des crépitements décelant l'existence de petites étincelles qui se produisent entre le cadre et le noyau de fer ou d'une couche de fil aux couches voisines. La violence du choc dépend du mode de liaison du galva-

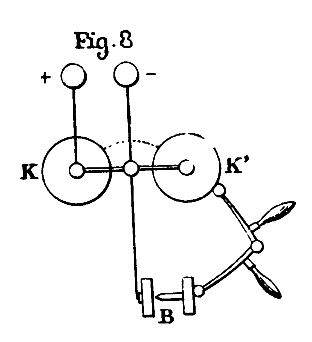
nomètre avec la batterie. Avec des fils très courts, on obtient une forte secousse qui peut mettre l'appareil hors d'usage; c'est d'ailleurs plutôt un soubresaut général qu'une déviation d'une valeur et d'un sens bien définis que reçoit le cadre dans ces conditions. Avec un fil de jonction de 3 ou 4 mètres seulement, le phénomène est notablement amoindri et lorsque les conducteurs mesurent chacun 8 mètres de longueur, on ne perçoit plus à l'intérieur de l'appareil que des crépitements extrêmement faibles et l'on peut, sans être incommodé par la secousse, toucher les deux bornes du galvanomètre avec les doigts et cela alors que les boules de l'excitateur sont éloignées de 15 millimètres et que les décharges des bouteilles éclatent avec violence.

L'irrégularité des impulsions du galvanomètre montre que celui-ci ne reçoit pas, au moment où la décharge se produit, un courant d'un sens bien déterminé; on se trouve en présence d'une attraction statique s'exerçant entre le fil et les objets voisins, les petites étincelles qui éclatent à l'intérieur de l'appareil en sont d'ailleurs la preuve. Cette bruyante décharge est donc oscillatoire, comme celles qui ont été examinées plus haut, puisque la faible self-induction du fil de connexion du galvanomètre lui offre un obstacle suffisant pour la faire éclater dans l'air. Il n'est pas nécessaire d'ailleurs que la lame d'air du paratonnerre soit extrêmement mince, elle peut être portée à 1 ou 2 millimètres sans que le galvanomètre indique autre chose et sans qu'on puisse cesser d'en toucher les bornes avec les doigts. Cependant, la décharge représente une provision d'énergie assez considérable; il est donc relativement facile de pro-

téger les appareils de ses effets destructeurs. Au contraire, le courant permanent de faible intensité qui traverse le galvanomètre ne peut être arrêté par aucun dispositif : un paratonnerre à pointes construit avec beaucoup de soin et permettant de rapprocher les armatures à $0^{mm},01$ n'empêche pas ce courant d'arriver à l'appareil. Il peut bien se produire de temps en temps une étincelle entre les armatures en présence, mais la décharge qui en résulte n'affaiblit pas d'une manière appréciable le courant permanent arrivant au galvanomètre.

On peut encore observer les mêmes effets si l'on remplace le galvanomètre par un paratonnerre à très mince lame d'air : le courant permanent produit entre ses armatures une sorte d'aigrette ou une série d'étincelles très grêles et très peu brillantes et la décharge brusque ne produit rien ou peu de chose.

Dans l'étude expérimentale de l'électrostatique, on se trouve presque constamment en présence de la superposition d'une décharge continue à variations relativement lentes et d'une décharge brusque à régime oscillatoire. C'est, par exemple, ce qui se produit lorsqu'on décharge une bouteille de Leyde au moyen d'un excitateur manœuvré à la main (*fig.* 8) : pendant que la branche mobile se rapproche de l'armature fixe, il se produit d'abord à travers l'air quelques aigrettes qui donnent naissance à un courant continu dans tout le reste de l'installation, ce courant en-



gendre d'ailleurs quelques étincelles grêles et silencieuses si le circuit présente de courtes solutions de continuité ; puis, au moment où les branches sont suffisamment rapprochées, une bruyante décharge éclate, éclaboussant le voisinage, mais ne se propageant pas dans les conducteurs au delà d'une distance d'ailleurs assez courte.

Il n'y a donc pas une différence essentielle entre la disposition expérimentale de la fig. 2 consistant à relier les armatures internes de deux jarres aux deux pôles de la machine pendant que l'objet à expérimenter est relié aux armatures externes et celle de la fig. 7, qui laisse éclater une étincelle lorsque le potentiel de la batterie atteint une valeur déterminée ; ou encore avec celle de la fig. 8 dans laquelle on dirige la charge sur l'appareil essayé au moyen d'un excitateur, la décharge principale est oscillatoire dans tous les cas et sa propagation dans les fils est gênée par leur impédance ; mais, dans les deux dernières dispositions, le phénomène est moins simple que dans la première, car, avant que cette décharge principale se produise, des aigrettes existent déjà qui diminuent la résistance mécanique du diélectrique et peuvent ainsi frayer la voie suivant laquelle cette décharge se produira.

Cette distinction peut avoir quelque importance en ce qui concerne l'analyse du mode d'action de la foudre sur les édifices, mais en présente peu en ce qui touche la protection des appareils télégraphiques.

II

MODE D'ACTION DE LA FOUDRE SUR LE MATÉRIEL TÉLÉGRAPHIQUE

9. *Détériorations et accidents causés par la foudre.* — La foudre cause assez fréquemment, surtout dans les régions montagneuses, des dégâts assez importants aux lignes télégraphiques. Sur quelques points du territoire, certains appuis reçoivent chaque été quelques coups de foudre : souvent la décharge orageuse ne manifeste son passage que par l'éclatement de quelques fibres de bois au sommet d'un poteau ; quelquefois par un arrachement qui s'étend jusqu'à la base ; mais il arrive aussi que des appuis tout entiers sont réduits en menus fragments, les isolateurs brisés et les fils fondus sur plusieurs portées consécutives. Lorsque de pareils désordres se produisent, le sol est quelquefois labouré par la foudre au pied des poteaux frappés. Généralement, plusieurs appuis consécutifs sont atteints, et au voisinage d'un poteau brisé on en trouve presque toujours plusieurs autres légèrement touchés plus ou moins grièvement.

Les lignes souterraines elles-mêmes ne sont pas à l'abri des atteintes de la foudre ; les détériorations sont assez fréquentes sur les câbles enfouis dans le sol sans enveloppe métallique, rares sur les câbles armés et presque exceptionnelles sur les lignes enfermées dans une conduite de fonte.

On peut ajouter enfin qu'il est arrivé des accidents en temps d'orage aux ouvriers travaillant à la pose

des fils et aux personnes situées au pied des appuis; ces accidents seraient sans doute beaucoup plus fréquents si les travaux n'étaient suspendus au moment où les orages éclatent.

10. *Les accidents survenant aux lignes s'étendent rarement aux bureaux un peu éloignés.* — Si violents que soient les coups de foudre qui frappent les lignes, ils n'ont généralement d'autres répercussion sur les installations intérieures que des détériorations de paratonnerres (fusion de pointes, perforation de feuilles isolantes, volatilisation de fils fins) et beaucoup plus rarement la mise hors d'usage d'électro-aimants. Lorsque des dégradations plus importantes que celles-ci se produisent dans les bureaux, il est presque toujours facile de reconnaître que la ligne a été frappée dans le voisinage immédiat du bâtiment où ce bureau est installé. Il n'est pas rare de constater qu'une ligne a été brisée en pleine campagne par un coup de foudre et que les appareils reliés à ses deux extrémités n'ont pas été endommagés. Ajoutons enfin que le personnel manipulant est très rarement incommodé par les effets de la foudre qui mutile les lignes.

Nous avons eu, pendant quatre étés consécutifs, l'occasion de constater ces résultats dans la région montagneuse de la Franche-Comté et ils nous ont causé à cette époque (1886-90) beaucoup d'étonnement. La loi d'Ohm ne permet pas d'expliquer de pareils faits, tandis que la considération de l'impédance en rend parfaitement compte, si l'on admet que ces décharges orageuses affectent le caractère oscillatoire; une faible longueur du fil présente dès lors assez d'ob-

struction pour que la majeure partie de la charge que reçoit le point frappé s'écoule à la terre par les supports les plus voisins et que le résidu qui parvient aux extrémités de la ligne ne puisse plus y produire d'effets énergiques.

11. *Courants perturbateurs à variatians lentes.* — D'autre part, on sait que les fils télégraphiques sont constamment traversés par des courants à variation plus ou moins rapide provenant de causes diverses : induction de conducteurs voisins, action électro-chimique des plaques de terre, différences de potentiel des masses dans lesquelles sont enfouies ces plaques, effets thermo-électriques, grandes perturbations accompagnant les aurores polaires, etc. ; mais, outre ces origines, l'électricité atmosphérique joue un grand rôle dans la production des courants parasites que l'on constate sur les lignes. Ces courants proviennent soit d'une action continue de la nature de celle qui produit l'électrisation des nuages eux-mêmes, soit du déplacement de masses électrisées au voisinage des fils, soit de la décharge lente des nuages sur ces conducteurs à travers la couche humide de l'atmosphère, soit enfin d'autres causes encore imparfaitement élucidées. Quoi qu'il en soit, leur présence est incontestable et tous les télégraphistes savent qu'en temps d'orage les électro-aimants et les galvanoscopes sont fréquemment actionnés par des courants intenses qui mettent en mouvement les sonneries et parleurs et altèrent les signaux transmis. Ces courants peuvent être à variation relativement rapide, ne produire qu'un choc dans une sonnerie ou n'imprimer qu'un point au récepteur Morse, ils peuvent être suivis d'un courant de sens

inverse provenant d'une rupture d'équilibre sur un autre point du conducteur, ils ne présentent pas cependant le caractère d'extrême instantanéité ou de rapide alternance des décharges dont il a été question plus haut. Ces courants sont peut-être susceptibles d'être allongés et en quelque sorte détendus par une forte self-induction ou une grande capacité placée en un point du circuit, mais cette modification est notablement moins importante que celle qu'avec des moyens analogues on peut faire subir à un courant alternatif de haute fréquence. En d'autres termes, ces courants doivent être rapprochés de ceux que nous avons obtenus dans la disposition expérimentale de la fig. 6. Il convient d'ailleurs de remarquer que ces perturbations à variations relativement lentes, mettant en jeu des intensité du même ordre de grandeur que celle des courants de travail, présentent beaucoup d'inconvénients pour l'exploitation télégraphique. Elles ne sont généralement pas dangereuses et n'occasionnent guère d'autre dérangement matériel que l'échauffement anormal de quelques bobines pouvant entraîner leur fusion et, dans des circonstances spéciales, provoquer un incendie. Cependant, le contact du corps humain avec un conducteur électrisé à plusieurs centaines de volts cause une sensation désagréable et il existe au au moins un cas bien constaté de mort d'homme résultant d'un coup de foudre ayant frappé une ligne à une cinquantaine de kilomètres du point où se trouvait la victime. La perturbation s'était propagée par le fil télégraphique et avait atteint un ouvrier travaillant sur un poteau (*).

(*) *Rapport sur les paratonnerres.* — Londres, 1882.

12. *Nécessité de deux genres de préservateurs basés sur des principes différents.* — La question de la protection des lignes électriques, du personnel et du matériel installé dans les bureaux semble donc être un problème complexe, puisqu'il s'agit de parer à des manifestations de forme très variable. Il est remarquable de constater que l'expérience a fourni depuis longtemps une solution déjà très satisfaisante de la question.

L'analyse faite plus haut montre qu'en ce qui concerne les coups de foudre violents éclatant brusquement sur les lignes, les diverses sections du conducteur se protègent mutuellement et préservent les installations des bureaux, mais cette protection est évidemment d'autant plus efficace que chaque appui présente à l'écoulement de la décharge un chemin plus commode. Il en est d'une ligne comme d'un arrangement de M. Lodge. Pour que, dans celui-ci, une paire de bobines ne laisse arriver aux pointes qui la suivent qu'une fraction de la décharge totale, il faut que les boules ou pointes qui précèdent ne soient pas séparées par un écartement excessif. De même, pour qu'une section de ligne protège les sections suivantes, il est bon qu'outre la perte d'énergie résultant de la production de chaleur sur le fil, une partie de la décharge puisse s'écouler au sol par les appuis intermédiaires et se dépenser en travail inoffensif. Pour faciliter cette dépense sans amener la détérioration des poteaux, on sera donc amené à placer, le long de chacun d'eux et au voisinage du fil, un conducteur dont l'extrémité sera enfouie dans le sol. L'énergie électrique aura pour effet d'échauffer ce conducteur et de remuer légèrement le terrain, mais n'occcasionnera pas la destruction de l'appui.

13. *Emploi des fils de terre sur les poteaux.* — Ces considérations justifient, dans une certaine mesure, l'usage en vigueur dans quelques pays, consistant à pourvoir tous les poteaux de fils de terre; non seulement ces paratonnerres protègent les appuis, mais ils contribuent à la sécurité des sections voisines de la ligne. Elles expliquent même, dans une certaine mesure, l'opinion de M. Preece, au sujet de l'efficacité des paratonnerres employés par le Post-Office; en effet, tous les appuis anglais sont pourvus de deux fils de terre et doivent, par suite, singulièrement protéger les installations intérieures contre les violents coups de foudre (*).

Conviendrait-il, d'après cela, de généraliser l'emploi des fils de terre sur le poteaux? Cette question est très délicate. Les expériences citées plus haut, et, en particulier, celles qui permettent de faire jaillir des étincelles sur un appareil témoin en le reliant aux armatures extérieures d'une paire de bouteilles de Leyde, semblent prouver que les lignes télégraphiques sont exposées aussi bien aux perturbations provenant du sol qu'à celles qui sont transmises directement par l'atmosphère. La multiplication de fils reliés à la terre au voisinage du fil de ligne aurait *probablement* pour conséquence d'augmenter les causes productrices de courants parasites sur les lignes ou plutôt de permettre à des causes existantes de produire des effets plus considérables; elle aurait *certainement* pour résultat de diminuer notablement l'isolement des conducteurs.

(*) En réalité, ces fils ne sont pas placés exclusivement en vue de protéger les appuis contre la foudre, mais afin de permettre de localiser plus facilement les dérangements en transformant les ruptures, déréglages de fils, etc., en pertes à la terre.

Il semble donc que les appuis des deux catégories suivantes seulement devraient être pourvus de fils protecteurs.

1° Ceux qui avoisinent les poteaux ou guérites de raccordement à des lignes souterraines et les entrées de poste, et cela sur une distance à déterminer suivant les circonstances, mais qui devrait comprendre au moins quatre ou cinq appuis consécutifs ;

2° Ceux qui sont plantés sur un terrain ou fixés à un bâtiment particulièrement exposé aux coups de foudre.

Lorsqu'il s'agit de lignes déjà construites, on peut admettre que tout appui déjà foudroyé est susceptible de l'être de nouveau et par suite qu'il y a lieu de le protéger, ainsi que ceux qui l'environnent. Pour des constructions neuves, il sera généralement facile, d'après l'étude topographique du tracé, de déterminer les points plus particulièrement exposés.

Les soins à apporter dans l'établissement de ce paratonnerre de ligne dépendront de l'importance de l'appui et des circonstances locales. On peut dire cependant, tant d'après l'expérience déjà acquise au sujet de dispositifs de ce genre que des considérations qui précèdent, qu'il n'y a pas lieu de recourir à des tiges et des câbles de haute conductibilité et qu'il suffira d'employer du fer, puisque, pour les fréquences très élevées, ce métal se comporte comme le cuivre; un fil de 4 millimètres de diamètre cloué le long du poteau et dépassant son sommet de quelques centimètres suffira généralement; si dans un cas particulier on désire augmenter la section, il vaudra mieux recourir à un ou plusieurs autres fils de même diamètre disposés symétriquement autour de l'appui

qu'employer des fils plus gros ou des conducteurs câblés. On pourra enfin, si on le juge convenable, pourvoir ces fils de ramifications arrivant individuellement à quelques centimètres des fils et, autant que possible, en dehors de l'isolateur pour éviter sa rupture; toutefois, ces dispositions compliquées exposant à des dérangements ne semblent recommandables que pour des cas tout à fait spéciaux.

En ce qui concerne la communication avec le sol, il suffira fréquemment d'enrouler l'extrémité du fil de fer à la base du poteau, dans la fouille, au moment de la plantation. Dans le cas où le terrain ne paraîtrait pas propice, on devrait conduire le fil en tranchée à un endroit plus humide et surtout lui donner un développement plus considérable.

14. *Jonction avec le sol des appuis métalliques placés sur les bâtiments.* — L'établissement de fils de terre reliés à des tourelles ou des appuis posés sur les toits revient à une véritable installation de paratonnerres d'édifices et il conviendra, le cas échéant, de s'inspirer des règles édictées à ce sujet, en remarquant cependant que plusieurs fils de fer séparés présentent une impédance moindre que les mêmes conducteurs câblés ou une tige unique de section équivalente et que leur disposition autour du bâtiment, leur combinaison et leur raccordement judicieux avec les pièces métalliques, conduites, etc., peut former une sorte de cage de Faraday, bien préférable à un conducteur unique.

15. *Paratonnerres des guérites de raccordement. Bobines d'impédance.* — Enfin, et pour les raisons qui

précèdent, il convient de maintenir l'usage de munir les guérites de raccordement de paratonnerres qui constituent des soupapes de sûreté, par lesquelles peuvent s'écouler les charges subsistant encore sur les fils. Ces guérites étant généralement éloignées des bureaux, il importe que les paratonnerres qu'on y installe ne donnent pas lieu à de fréquents dérangements nuisibles à l'exploitation. Si les appuis du voisinage sont pourvus de fils de terre, comme il vient d'être indiqué, ces appareils pourront satisfaire à cette condition, tout en présentant une assez grande efficacité; il n'y aura pas lieu de redouter un transport de métal d'une armature à l'autre; mais si cette précaution n'a pas été prise, on pourra y suppléer en employant deux paratonnerres au lieu d'un seul : le premier, robuste, destiné à recevoir le choc principal, sera, par exemple, un paratonnerre Berstch ou un paratonnerre à lame d'air présentant un intervalle un peu large; le second, qui ne sera exposé qu'à une décharge déjà atténuée, aura des armatures plus rapprochées; une paire de bobines de fil soigneusement isolé reliera d'une part les armatures de ligne, d'autre part les armatures de terre. On augmentera enfin la protection des câbles partant de la guérite, si on le juge convenable en disposant une autre bobine entre ceux-ci et le dernier paratonnerre.

La construction de ces bobines est d'ailleurs extrêmement simple et peu coûteuse. D'après M. Lodge, il suffirait de former chacune de 6 ou 8 mètres de fil; les résultats des expériences faites avec des bouteilles de Leyde montrent en effet que ces bobines suffisent pour arrêter la plus grande partie d'une décharge brusque, mais comme il n'est pas établi que la fré-

quence des décharges orageuses soit aussi élevée, il sera prudent d'augmenter cette longueur, au moins tant qu'on n'aura pas des renseignements plus complets à ce sujet. Nous serions donc d'avis de constituer la première paire au moyen de 12 mètres de fil isolé à la gutta-percha, et la seconde paire de 20 mètres de fil de cuivre de 1 millimètre recouvert de deux couches de soie; ces fils seraient enroulés sur une carcasse de bois de quelques centimètres de longueur en ayant soin de séparer chaque rangée de spires des rangées voisines au moyen d'une épaisse feuille de papier paraffiné. Le noyau de fer n'a pas paru indispensable à M. Lodge, néanmoins il ne semble pas nuisible; la résistance de l'ensemble de ces bobines n'atteindrait pas un ohm, leur self-induction serait extrêmement faible, leur introduction sur des fils télégraphiques ou téléphoniques serait donc sans influence sur les transmissions.

Ces appareils seraient évidemment inefficaces vis-à-vis des courants de faible tension à variation lente, mais on ne saurait songer à placer des fils fusibles dans les guérites pour s'opposer aux courants de ce genre.

16. *Paratonnerres des bureaux. Montage à double fil.* — Dans les bureaux, au contraire, on peut obtenir une protection plus complète, puisqu'il est facile de vérifier et de remettre les appareils en état. On doit d'abord installer des paratonnerres à décharge aussi près que possible de l'entrée des lignes. On peut, en outre, augmenter l'efficacité de ces protecteurs en recourant à un montage symétrique représenté fig. 9 et consistant à supprimer sur les tables de manipula-

tion le fil de terre commun à plusieurs récepteurs et à relier chacun d'eux à son paratonnerre par un double

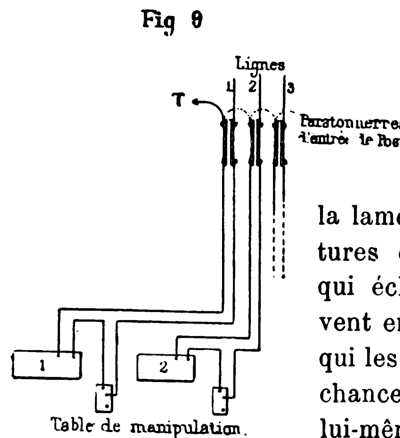


Fig 9

fil. Dans ces conditions, toutes les connexions situées au delà du paratonnerre présentent à la décharge un chemin plus long et plus résistant que la lame d'air qui sépare les armatures du protecteur; les résidus qui échappent à cet appareil peuvent encore fuser à travers l'isolant qui les sépare, mais n'ont guère de chance de parvenir au récepteur lui-même.

On peut objecter à ce montage, en se basant sur la théorie de M. Lodge elle-même, que le circuit qui relie le paratonnerre à l'appareil présente une self-induction plus faible s'il est constitué par deux brins câblés côte à côte que s'il est formé par deux conducteurs ayant des parcours différents, mais la disposition proposée permet de placer des bobines supplémentaires sur le fil de ligne et sur le fil de terre et par conséquent de protéger le récepteur contre les perturbations provenant de l'une ou de l'autre direction; elle présente enfin l'avantage de réduire au minimum les chances de propagation d'une décharge orageuse d'un fil sur l'autre à l'intérieur du bureau et d'éliminer tous les effets d'induction mutuelle.

Il faut enfin compléter cette installation par une disposition protégeant les appareils contre les courants continus d'intensité dangereuse. Il n'existe guère, jusqu'à présent, que les fils fusibles, combus-

tibles ou à enveloppe combustible ou encore une ingénieuse modification du fil fusible, le papier recouvert d'une mince couche métallique. Depuis quelques années, une nouvelle cause de perturbations menace les installations télégraphiques et téléphoniques : c'est le voisinage des canalisations électriques industrielles. Ce nouveau danger est plus grave que la foudre elle-même; il impose des précautions particulières. Nous ne parlerons pas ici des fils fusibles ou combustibles, nous réservant d'y revenir prochainement si nous pouvons présenter à ce sujet une étude un peu avancée.

17. *Cas des circuits fermés métalliquement.* — La protection des circuits téléphoniques et d'une manière générale des installations au double fil est un peu différente de celle des lignes à simple fil utilisant la terre comme fil de retour.

Une construction bien symétrique doit placer les deux conducteurs dans la même situation par rapport aux influences orageuses; *si l'installation intérieure ne comprend aucun point de contact avec la terre*, il n'y a guère de chances pour que ces circuits soient parcourus par des courants continus jetant des perturbations dans les transmissions ou brûlant les bobines des récepteurs; on peut donc, si ces conditions sont remplies, se dispenser d'établir des paratonnerres à fil fin. Cet avantage du circuit métallique est extrêmement précieux pour l'exploitation, puisque ce sont surtout les courants continus ou à variation lente qui troublent les communications; il faut donc le conserver chaque fois qu'on n'aura pas des raisons capitales pour en justifier l'abandon; par suite, il conviendra d'éviter autant que possible la mise à terre

d'un point des circuits bifilaires soit pour le *test*, soit pour la télégraphie simultanée, soit pour toute autre cause.

Mais si l'isolement complet d'un circuit métallique de la terre est favorable à son emploi et peut masquer presque toutes les perturbations orageuses qui se produisent sur son parcours, il n'empêche pas les deux conducteurs de recevoir des décharges orageuses. En raison de leur isolement, les charges qui peuvent s'y accumuler dépassent probablement celles que prennent les simples fils; à ce point de vue, ces circuits nécessitent donc au moins les mêmes précautions que les autres lignes pour éviter les conséquences fâcheuses d'un coup de foudre éclatant dans le voisinage d'un bureau ou du domicile d'un abonné. Il convient donc de pourvoir ces fils de paratonnerres à décharge installés à l'entrée des bâtiments et de munir les appuis de raccordement et ceux qui les précèdent d'une communication à la terre. En pratique, cela revient à pourvoir de fils de terre tous les appuis des réseaux installés dans les localités exposées aux orages.

III

REMARQUES RELATIVES AUX PARATONNERRES EXISTANTS

18. *Considérations générales sur les paratonnerres. Forme des armatures. Nature du diélectrique. Surfaces.* — Les indications qui précèdent montrent qu'on peut tirer, dans un grand nombre de cas, même

des paratonnerres les plus grossiers, une protection partielle et qu'il est possible d'augmenter leur efficacité au moyen de quelques artifices.

Les appareils à décharge, qu'ils soient pourvus de pointes ou de stries ou qu'ils se composent simplement de deux plaques métalliques très rapprochées, présentent à peu près la même valeur, pour une même distance des armatures, en ce qui concerne les décharges brusques; les dispositifs pourvus de pointes très aiguës paraissent au contraire plus efficaces pour dériver une partie des charges ayant un caractère moins instantané.

Les appareils formés de deux plateaux métalliques séparés par une feuille isolante ne sont pas aussi sensibles que ceux qui contiendraient seulement un intervalle d'air de même épaisseur, mais ces derniers sont pratiquement irréalisables et en fait les paratonnerres à lame d'air qu'on peut construire à bon marché ne sont pas plus efficaces que les paratonnerres à papier mince ou à feuille de gutta.

Dans la pratique, il importe peu de réaliser un appareil de haute sensibilité si le premier effet de son fonctionnement est de le mettre hors d'usage ou de causer un dérangement. C'est pourquoi on doit abandonner les pointes très aiguës qui s'émoussent et augmentent par suite la distance des armatures; c'est pourquoi aussi les paratonnerres à lame d'air bien construits sont préférables aux protecteurs à feuille de papier ou de gutta-percha dont la carbonisation sous l'effet d'une étincelle produit une communication à la terre, contact d'autant plus embarrassant dans la pratique qu'il est souvent imparfait et intermittent. Mais les paratonnerres à feuille isolante incombustible et évidée

semblent encore préférables. La faible épaisseur de l'isolant permet de rapprocher beaucoup plus les armatures qu'on ne le pourrait avec un autre mode de construction d'un paratonnerre à air.

L'altération superficielle des contacts étant très rapide avec des armatures en laiton et cette modification équivalant à une augmentation de la couche isolante pouvant atteindre plusieurs dixièmes de millimètre, on améliorerait sans doute la sensibilité de ces dispositifs en prévenant l'oxydation soit en recouvrant les armatures d'un métal inaltérable, l'or par exemple, soit en les soustrayant à l'action de l'air. C'est probablement en vue d'éviter cette diminution de sensibilité et pour réduire au minimum le transport d'une armature à l'autre que quelques constructeurs ont remplacé les plaques métalliques par des pièces de charbon moulé.

Le Post-Office anglais installe sur les circuits téléphoniques à longue distance un paratonnerre de ce genre formé de deux disques de charbon séparés par un mica découpé.

M. de la Touanne a donné dans les *Annales télégraphiques* (*) la description d'un paratonnerre construit par la *Western-Electric C°* qui comprend deux prismes de charbon moulé séparés par un mica échancré; une ingénieuse disposition permet de retirer très facile-

(*) *Annales télégraphiques*, 1894, page 437. — Cet appareil comprend, outre l'organe de décharge, un globule de métal très fusible qui établirait un court circuit entre les deux charbons si un arc venait à s'y produire et une thermo-bobine mettant la ligne à la terre si un courant continu vient à la traverser pendant un certain temps.

L'Electrician du 5 novembre 1897 donne une description d'une nouvelle forme de ce protecteur qui contient en outre un fil fusible qui se rompt sous un courant de 5 ampères de courte durée.

ment ces blocs pour les vérifier. Cet appareil doit fonctionner sous une différence de potentiel de 350 volts. C'est, en effet, la force électromotrice qui correspond à l'épaisseur de la couche d'air, d'après la formule de Thomson. Ce paratonnerre doit être considéré comme un appareil de haute sensibilité susceptible de produire un dérangement lorsqu'il reçoit une violente décharge; il ne saurait donc être installé dans les guérites de raccordement ou chez des abonnés sans être protégé lui-même par un autre appareil plus grossier destiné à essuyer le premier choc.

19. *Paratonnerre Thiériet*. — L'Administration a mis en service, à titre d'essai, depuis plusieurs années, un paratonnerre basé sur une idée très ancienne, mais qui avait été reprise à nouveau par M. Thiériet, agent spécial. Cet appareil (*fig.* 10) comprend un électro-aimant à gros fil dont les extrémités sont reliées, l'une au noyau, l'autre au récepteur; la ligne communique au noyau, enfin l'armature est reliée à la terre; des contacts platinés se trouvent d'ailleurs en face l'un de l'autre sur le noyau et sur l'armature. D'après l'auteur, lorsqu'un courant un peu intense provenant de la ligne arriverait au récepteur, l'armature du préservateur serait attirée et la ligne mise momentanément à la terre et par suite déchargée.

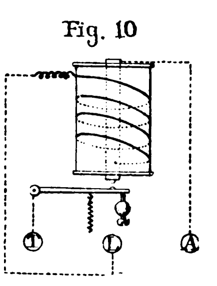


Fig. 10

Or, l'attraction de l'armature exige qu'un courant continu de $0^{amp},3$ circule dans l'électro pendant un temps appréciable. La nature des détériorations causées aux installations des bureaux tend à prouver

que la foudre ne doit produire de courants de ce régime que dans des circonstances absolument exceptionnelles. Cependant, ce paratonnerre a donné de bons résultats, tant lors de sa mise en service que dans les essais de laboratoire. Mais, dans ces derniers, on a pu constater que la palette n'était jamais attirée, même par les plus fortes décharges que peuvent donner les batteries de Leyde; l'étincelle jaillit entre le noyau et l'armature et les appareils reliés à ce paratonnerre ne reçoivent qu'un résidu insignifiant. La bobine agit par son impédance et l'armature pourrait sans inconvénient être supprimée et remplacée par un dispositif de plateaux ou pointes plus approprié à recevoir des étincelles.

Le bon fonctionnement du paratonnerre Thiériet justifie la théorie générale qui précède. Cette théorie conduit naturellement à une simplification de sa construction; il peut se faire cependant que, maintenu sous sa forme actuelle, cet appareil puisse rendre encore des services pour parer à un danger d'une autre nature et remplir un rôle spécial. L'objet que nous avons en vue est la fusion d'un coupe-circuit au voisinage des canalisations industrielles.

IV

PARATONNERRES A VIDE.

20. *Rappel de quelques résultats connus, augmentation de la distance explosive dans les gaz raréfiés.* — On sait, depuis longtemps, que lorsqu'on raréfie l'atmosphère entourant deux électrodes, on peut

augmenter leur écartement bien au delà de la distance explosive correspondant à une distance déterminée sous la pression atmosphérique et obtenir néanmoins une étincelle. A mesure que la raréfaction augmente, le caractère de la décharge se modifie ; l'étincelle étroite, tout à fait blanche et très brillante s'élargit, diminue d'éclat et se colore. Pour une raréfaction un peu plus accentuée, la forme d'étincelle s'évanouit et il ne reste plus qu'une lueur discontinue, ayant un aspect différent au voisinage des deux électrodes ; en même temps, les parois de l'enveloppe deviennent phosphorescentes et des phénomènes nouveaux apparaissent ; enfin, pour des épuisements extrêmes (quelques millionièmes d'atmosphère), ces manifestations cessent à leur tour et aucun échange électrique ne se produit entre les électrodes en regard, si rapprochées qu'elles soient. Quelques-uns de ces phénomènes ont été observés avec des piles, mais c'est surtout avec des bobines d'induction et des machines statiques qu'on en a entrepris l'étude ; ils ont donné lieu à des travaux considérables mais dans un ordre d'idées différent de celui qui nous occupe.

21. *Résultats des expériences de MM. W. de la Rue et H. Muller.* — Ceux qui se rapprochent le plus de cet objet particulier, sont les travaux de Lord Kelvin sur les distances explosives et les recherches expérimentales de Warren de la Rue et Hugo Muller au moyen de la pile au chlorure d'argent. Ces derniers savants ont étudié la décharge produite par des forces électromotrices comprises entre 250 à plusieurs mille volts, d'abord dans l'air, entre des électrodes de formes et de substances diverses, ensuite dans diffé-

rents gaz raréfiés. Ils ont enfin mesuré l'intensité débitée par ces décharges dans quelques cas. Les résultats de ces recherches peuvent être résumés en quelques lignes :

1° Pour une différence de potentiel déterminée, la forme qui permet d'écarter les électrodes à une distance maxima est celle de deux pointes de forme parabolique (*) ; viennent ensuite une pointe parabolique en présence d'un plan, deux surfaces cylindriques concentriques, deux plans et enfin deux surfaces sphériques ayant leur convexités en regard ; ce dernier cas étant, en pratique, celui des deux électrodes sphériques. Les deux pointes ou la pointe et le plan sont d'ailleurs presque équivalents ; les deux plans et les deux surfaces cylindriques ou sphériques donnent également des résultats semblables, mais l'écartement qui leur correspond n'est guère que le tiers ou le quart de celui que les pointes permettent de réaliser.

2° La plupart des métaux employés comme électrodes fournissent la même distance explosive pour un voltage déterminé ; l'aluminium produit une augmentation de cette distance de 20 à 30 p. 100.

3° Toutes choses étant égales d'ailleurs, la distance explosive dans les divers gaz secs est à peu près la même, sauf pour l'hydrogène auquel correspond une distance double.

4° A mesure qu'on raréfie l'atmosphère entourant deux électrodes situées à une distance invariable, on peut provoquer entre elles le passage d'un courant de

(*) Plus exactement, la forme du solide engendré par une parabole tournant autour d'un axe parallèle et situé à peu de distance de son axe principal.

force électro-motrice moindre, mais le caractère change : jusqu'à 2 ou 3 millimètres de pression, l'étincelle est continue; au-dessous, elle devient stratifiée.

22. *Influence des circonstances accessoires.* — M. Spottiswode a d'ailleurs montré que lorsque la raréfaction atteint une certaine limite, quelques dixièmes de millimètre, par exemple, le passage de la première décharge entre les électrodes pouvait être provoqué par des causes extérieures : par exemple l'approche d'un corps métallique, la main de l'opérateur, etc... Plus récemment enfin, on a découvert que ces phénomènes variaient sous l'action de la lumière ultra-violette, de sorte que la forme du récipient et les circonstances accessoires ont beaucoup plus d'importance sur le phénomène que la distance des électrodes ou le degré de raréfaction ; d'ailleurs lorsque la première étincelle a jailli, la décharge est pour ainsi dire amorcée, sa trajectoire devient plus conductrice et on peut faire disparaître l'étincelle.

Il convient de faire quelques remarques au sujet des résultats de W. de la Rue. Ils ont été obtenus au moyen d'une pile très résistante (une dixaine d'ohms par élément) qui, fermée en court circuit, ne donnait que $0^{amp}, 11$; le courant fourni par une telle pile, lorsque l'étincelle traverse une couche gazeuse d'une certaine épaisseur est extrêmement faible ; les résultats pourraient donc être tout différents avec une source fournissant un débit plus élevé. Plaçant un condensateur en dérivation entre les pôles de la pile, de manière à débiter, au moment où l'arc se produit, une intensité plus considérable, M. W. de la Rue a en effet remarqué que les électrodes de diverses formes

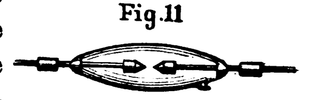
fournissaient, dans ces conditions, des distances explosives moins dissemblables. Les remarquables expériences de M. Planté, effectuées avec des accumulateurs donnant un voltage moins élevé mais susceptibles de fournir, le cas échéant, un grand débit, montrent également que la quantité modifie singulièrement ces phénomènes. Enfin, quelques-unes des expériences citées plus haut, faites au moyen de bouteilles de Leyde chargées par une machine statique, prouvent que le mode d'action des électrodes dans l'air dépend dans certaines circonstances plus du régime de la décharge que de la forme des pièces en présence.

Remarquons d'ailleurs que pour la télégraphie, il n'est pas nécessaire de construire des tubes de Geissler dans lesquelles l'étincelle doive atteindre une grande longueur : il suffit de placer les électrodes à une distance telle qu'un accident mécanique ou qu'un transport métallique dû à la décharge ne puisse les amener au contact ; cette condition satisfaite, le tube de Geissler sera d'autant meilleur comme paratonnerre que sa disposition permettra d'obtenir entre les électrodes un débit plus considérable : un paratonnerre qui commencerait à fonctionner à 200 volts, mais qui, sous un voltage dangereux, ne débiterait que quelques milliampères, serait un protecteur illusoire, bien inférieur à celui qui, moins sensible au début, permettrait d'écouler un courant beaucoup plus intense survenant brusquement.

23. *Paratonnerre Varley. — Modèle du Post Office.* — C'est Varley qui semble avoir employé le premier le tube de Geissler à la protection des appareils télégraphiques, son paratonnerre à vide est encore

employé sur certains câbles sous-marins. Le *Post Office* anglais place simultanément dans les boîtes servant au raccordement des lignes aériennes avec les lignes souterraines deux paratonnerres différents : l'un à plaques et à lame de mica découpée, l'autre à vide. Ce dernier est formé (*fig.* 11) d'une ampoule de verre de 40 millimètres de longueur et de 12 millimètres de diamètre; un fil de platine de 1 millimètre est soudé à chaque bout de l'ampoule; chacun d'eux est pourvu à l'intérieur d'un cylindre d'aluminium terminé en pointe conique, à l'extérieur d'un minuscule manchon fileté le raccordant à un fil de cuivre servant à la prise de contact avec la ligne ou la terre; de petites calottes de laiton fixées à l'aide de cire à cacheter, protègent les extrémités de l'ampoule à l'endroit où les fils sont soudés; un tube latéral sert à faire le vide, on le détache au chalumeau à la fin de l'opération. Cet appareil semble donc satisfaire aux conditions qui découlent du travail de MM. de la Rue et Muller. L'emploi assez étendu qu'en fait le *Post Office* semble prouver qu'il donne de bons résultats ou bien qu'on ne met pas en doute la théorie de son fonctionnement.

Fig.11



24. *Résultats obtenus par Van Rysselberghe.* — Dans une étude publiée en 1887 (*), Van Rysselberghe a contesté l'efficacité de ces appareils, ou plutôt a mis en doute leur bon fonctionnement au bout de quelques années de construction. Il avait remarqué que des

(*) *Bulletin de la Société belge d'Électriciens*, 1887.

tubes qui livraient passage à un courant sous 500 volts, au moment où ils avaient été fabriqués, ne laissaient rien passer sous 750 volts, au bout de 3 ans.

Les observations de cet expérimentateur avaient porté sur des tubes dans lesquels il avait enfermé différents gaz, à des degrés de raréfaction compris entre $0^{mm},5$ et 5 millimètres. Les tubes qui, à l'origine, lui fournissaient les meilleurs résultats étaient ceux dont la pression était voisine de 3 millimètres.

Les anomalies constatées dans les tubes au bout de 3 ans, peuvent vraisemblablement être attribuées à une modification des surfaces métalliques, sous l'action des résidus gazeux, ou à une rentrée d'air accidentelle ; ce fait se produit fréquemment lorsqu'on soude un fil de platine à travers la paroi d'un tube de verre.

Van Rysselberghe avait opéré avec des piles Leclanché d'un grand nombre d'éléments. Nous avons repris cette étude d'abord au moyen des bouteilles de Leyde, d'après la méthode de Lodge, puis avec une machine statique donnant une production continue ; enfin avec une installation susceptible de donner des effets mixtes ; dans chaque cas nous avons opéré sur des appareils isolés ou reliés à un circuit figurant une dérivation au sol, analogue à celle qu'offrirait un récepteur télégraphique. Nous allons indiquer sommairement les résultats obtenus, renvoyant à une note plus détaillée, placée à la suite de cet article, pour les indications numériques et les détails d'expérience.

25. *Paratonnerre à vide soumis à des décharges brusques.* — L'efficacité d'un paratonnerre déterminé,

placé dans une enveloppe étanche et soumise à des décharges brusques ne varie pas sensiblement lorsqu'on raréfie l'air de ce récipient depuis la pression atmosphérique jusqu'à une dizaine de millimètres de mercure. Pour une raréfaction plus complète, l'efficacité semble diminuer un peu, tout en demeurant du même ordre de grandeur. On constate, en effet, qu'un second paratonnerre, relié au premier et réglé d'une certaine façon invariable (*) ne reçoit aucune trace de décharge lorsque le premier est à une pression supérieure à 10 millimètres, tandis qu'il reçoit des résidus d'autant plus considérables que la pression s'abaisse davantage dans celui qu'on étudie.

La diminution d'efficacité, sous l'influence de la raréfaction, d'un paratonnerre soumis à des décharges brusques est plus appréciable si cet appareil est pourvu d'armatures de faibles dimensions, ou de pointes aiguës que s'il est constitué par des plateaux métalliques bien dressés ayant une certaine étendue.

Les résultats précédents demeurent absolument les mêmes et le caractère de l'étincelle n'est pas modifié si on relie les deux armatures par un conducteur comprenant un récepteur télégraphique.

Par conséquent, *pour préserver de décharges brusques, un paratonnerre à vide ne présente aucun avantage sur un paratonnerre semblable placé à l'air libre.* Il est plutôt légèrement inférieur à ce dernier.

26. *Paratonnerre à vide soumis à une décharge continue.* — Sous la pression atmosphérique, un paratonnerre quelconque dont les armatures sont reliées

(*) Au lieu d'employer un témoin invariable, il est plus intéressant d'employer un micromètre et déterminer des distances-limites.

aux pôles d'une machine statique en mouvement, assure à l'électricité produite par cette machine un écoulement permanent par aigrettes ou effluves. Lorsque deux paratonnerres sont reliés simultanément aux pôles d'une machine, si leur degré d'efficacité est peu différent, ils concourent l'un ou l'autre et quelquefois simultanément au passage du courant ; s'il y a entre eux une différence notable d'efficacité, pour ce régime de décharge préparée, l'un d'eux seul fonctionne. Dans ces conditions, on constate, par exemple, qu'un paratonnerre à pointes aigües livre beaucoup plus facilement passage au courant qu'un paratonnerre à plaques bien dressées.

On constate de la même façon qu'un paratonnerre enfermé dans une enveloppe étanche est d'autant plus efficace que la pression intérieure est moindre, et cela jusqu'à ce que cette pression s'abaisse à 2 ou 3 millimètres de mercure. Pour une raréfaction plus grande, le caractère de la décharge change : le tube devient lumineux et il suffit pour l'éclairer d'une très faible quantité d'énergie électrique; une partie notable du courant peut alors prendre un autre chemin.

Un paratonnerre dont la raréfaction est comprise entre 2 et 10 millimètres semble être un bon dispositif pour assurer l'écoulement de l'électricité qui tendrait à s'accumuler par suite d'une production continue due à une cause quelconque, *sur un conducteur complètement isolé.*

Mais si, outre les paratonnerres essayés, on établit entre les pôles de la machine génératrice une dérivation quelconque, rien ne passe plus dans les paratonnerres, toute la charge s'écoule par la dérivation, *alors même qu'elle offrirait une grande résistance et*

une forte self-induction. Par conséquent, une ligne qui est en relation avec la terre par les électro-aimants des récepteurs situés à ses deux extrémités, ne sera pas protégée par un paratonnerre à vide, contre les effets électriques résultant d'une production continue: tout le courant ainsi engendré traversera les récepteurs et, suivant son intensité, sera sans effet, troublera les transmissions ou déteriorera les appareils.

En d'autres termes, lorsque les lignes seront affectées par des courants de ce régime, des paratonnerres à vide, même d'une grande sensibilité, seront impuissants à éviter la perturbation des signaux et la fusion des fils sur les conducteurs ayant une communication avec le sol : les installations télégraphiques ordinaires par exemple. Au contraire, il y a lieu de supposer que de pareils dispositifs contribueront puissamment à décharger, dans les mêmes circonstances, les lignes bifilaires complètement isolées, et par suite à éviter que la charge qu'elles acquièrent puisse s'élever à un potentiel plus dangereux.

27. *Paratonnerres à vide soumis à des décharges à variation relativement lentes.* — Un paratonnerre à vide soumis à des décharges à variation relativement lente, c'est-à-dire n'ayant pas le caractère de très haute fréquence des oscillations électriques données par les condensateurs, fonctionne comme sous l'action d'une production continue, c'est-à-dire présente beaucoup plus d'efficacité qu'un paratonnerre identique sous la pression atmosphérique et voit son fonctionnement arrêté par la présence d'une dérivation entre ses bornes ; mais ce dernier effet est moins accentué que dans le cas d'un courant continu ; une partie du cou-

rant échappe à la dérivation et franchit le paratonnerre et cette fraction est d'autant plus grande que l'impédance de la dérivation est plus forte.

Un paratonnerre à vide pourra donc fonctionner sur une ligne unifilaire ayant des relations avec le sol par les récepteurs, si elle est exposée à des variations de ce genre, mais le coefficient d'efficacité ne serait pas aussi élevé que dans le cas d'un circuit métallique complètement isolé.

28. *Forme proposée pour les paratonnerres à vide.* — Lorsqu'il s'agit d'enfermer des organes électriques dans un récipient où l'on doit faire le vide, la forme des pièces et des fils de connexion présente une importance particulière. Il est commode de recourir à une enveloppe de verre tant à cause de l'étanchéité que cette substance permet d'obtenir qu'en raison de sa transparence si avantageuse pour la vérification.

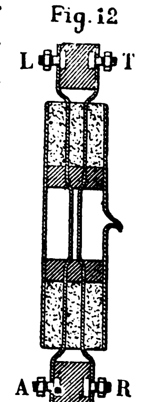
Mais pour souder des fils conducteurs aux parois d'une ampoule de verre, certaines précautions s'imposent ; il faut recourir au fil de platine dont le coefficient de dilatation est voisin de celui du verre et l'employer sous un diamètre assez petit, sans quoi les variations de température occasionnent des ruptures. D'autre part, pour l'usage courant, il ne saurait être question de dispositifs coûteux : c'est sans doute ce qui a conduit le *Post Office* à donner aux ampoules décrites plus haut des dimensions aussi réduites.

Or, l'analyse qui vient d'être faite montre qu'un paratonnerre à vide ne sera particulièrement efficace qu'en présence des courants continus d'un certain voltage : si cet appareil est très fragile, il faudra le

doubler au moyen d'un autre, qui essuiera le coup des décharges brusques. Nous avons cherché à éviter cette sujétion en réalisant un appareil robuste et efficace devant toutes les formes de décharges.

Deux lames de laiton LA, TR (*fig.* 12) étampées suivant un profil tel qu'elles soient parallèles et très rapprochées (1 millimètre) vers le milieu, parallèles et un peu plus éloignées de part et d'autre (8 millimètres) où elles sont engagées dans deux bagues d'ébonite et fixées par deux cales isolantes; plus éloignées encore (15 millimètres) aux extrémités qui sont pourvues de bornes pour l'attache des communications. Le système ainsi préparé est introduit dans un tube de verre et mastiqué avec soin aux deux bouts, de manière à former des joints étanches. Une petite branche latérale soudée au tube-enveloppe, sert à faire le vide; à la fin de l'opération, on ferme cette tubulure au chalumeau.

Fig. 12



Des essais d'obturation au mastic de fontainier nous ont jusqu'ici donné de bons résultats; il est possible cependant qu'il soit nécessaire de recourir à un autre procédé de fermeture pour éviter des ruptures ou des rentrées d'air par suite de grandes variations de température.

Il convient de remarquer que la terre doit toujours être attachée à la borne T, située en face de l'entrée L de la ligne. Le fil allant au récepteur est attaché en A et si le montage comporte la prise de terre du récepteur par le paratonnerre, ce fil est relié en R. De cette façon l'impédance des conducteurs et du

paratonnerre lui-même tend à faire éclater la décharge au voisinage des bornes L et T, ou au moins à l'intérieur du tube.

V

CONCLUSIONS

29. *Exposé du problème à résoudre pour la protection des installations télégraphiques et téléphoniques.* — Il résulte de ce qui précède que l'on doit considérer les phénomènes orageux auxquels les lignes télégraphiques sont exposées comme donnant naissance à deux catégories de courants très différents dans leur mode d'action : les courants à très haute fréquence et les courants à variation relativement lente ; ces deux régimes pouvant d'ailleurs se succéder rapidement et même se superposer pour produire les effets les plus variés.

La propagation des courants à haute fréquence est gênée par l'impédance des conducteurs et les décharges ayant exclusivement le caractère oscillatoire ne présentent probablement de danger que dans une zone très restreinte environnant le point frappé.

Les courants à variation lente sont soumis à la loi d'ohm, ils affectent la totalité des conducteurs télégraphiques et les bobines des appareils auxquels ils sont raccordés ; dans l'état actuel de nos connaissances, il semble qu'il n'y ait pas d'autre moyen de s'opposer à leur effet fâcheux que d'intercepter la communication par un coupe-circuit.

Les paratonnerres à fil préservateur et les paraton-

nerres à décharge semblent donc, d'après cette nouvelle théorie, comme d'après l'ancienne, deux organes indispensables pour protéger les lignes faisant usage de la terre comme retour, contre les effets destructeurs de la foudre.

Pour les lignes bifilaires à conducteurs bien symétriques, si l'on évite totalement d'établir une communication à la terre à l'intérieur des installations ainsi que la possibilité d'une mise à terre accidentelle, les appareils qui les desservent ne doivent pas être exposés aux effets fâcheux des courants permanents et par suite les coupe-circuits semblent superflus ; mais sur ces lignes comme sur les lignes monofilaires, des paratonnerres à décharge sont indispensables (*).

30. *Efficacité des procédés employés jusqu'ici. — Moyen de l'augmenter.* — La théorie nouvelle présente cette particularité remarquable qu'elle ne condamne pas les dispositions pratiques auxquelles l'observation, l'expérience et les théories antérieures ont déjà conduit, en ce qui touche les moyens de se préserver de la foudre ; elle explique un grand nombre de faits demeurés obscurs jusqu'alors ; elle montre l'importance de quelques particularités d'installation et la moindre utilité d'autres ; elle laisse debout presque toutes les instructions relatives à l'édification des paratonnerres et confirme les obser-

(*) Nous n'ignorons pas, en émettant cette opinion, que, sur certains réseaux bifilaires, on a été amené à placer des fils fusibles pour éviter la détérioration fréquente des annonciateurs des bureaux centraux, mais nous croyons que, dans ces installations, les conditions hypothétiques que nous supposons plus haut ne sont pas entièrement satisfaites et nous appelons particulièrement l'attention sur ce point qui mérite d'être élucidé par des observations faites avec soin.

vations et les remarquables déductions de Melsens. En ce qui touche plus particulièrement la télégraphie, elle conduit à cette conclusion qu'on ne peut pas réaliser un paratonnerre unique procurant à lui seul une sécurité absolue dans tous les cas, mais elle amène à protéger les installations intérieures par une série de défenses, commençant sur les lignes elles-mêmes à l'extérieur des bâtiments, à n'introduire dans ceux-ci que des fils ne présentant plus qu'une faible charge et enfin à soutirer ce résidu par des dispositifs dont l'efficacité peut être graduée d'après la fragilité des organes à protéger, les appareils à vide paraissant ne présenter d'efficacité particulière qu'en présence de conducteurs sans communication avec le sol.

Cette méthode qui consiste plutôt en une légère modification des installations actuelles qu'en la construction de nouveaux types, nous semble donc mériter d'être mise en pratique, en l'appliquant rigoureusement dans les cas où le matériel est très délicat ou particulièrement exposé aux atteintes de la foudre et avec plus de marge dans la plupart des installations courantes.

31. *Protections extérieures.* — La première chose à faire consiste à favoriser la dissipation sur les lignes aériennes de la violence des coups de foudre qui pourraient avoir une répercussion sur les câbles, dans les bureaux ou dans les postes d'abonnés. Il convient donc de pourvoir d'un fil de terre :

1° Les appareils d'arrêt des fils raccordés aux lignes souterraines et aux entrées de poste ;

2° Les 4 ou 5 poteaux précédant les appuis d'arrêt ;

3° Les tourelles, herses, potelets métalliques établis sur les toits, principalement lorsque ces appuis supportent des lignes bifilaires. Si les édifices sur lesquels ces supports sont établis sont pourvus d'un paratonnerre très voisin des dits supports, il suffira d'établir entre eux une relation métallique ; dans le cas contraire, il faudra poser un fil spécial ;

4° Les poteaux plantés en des points particulièrement exposés aux atteintes de la foudre.

Ces fils de terre seront posés, au mieux des circonstances, en s'inspirant des règles édictées pour l'installation des paratonnerres Franklin ; ils seront en fer de 4 ou 5 millimètres de diamètre.

32. *Protections intérieures.* — Nous distinguerons deux catégories : la première se rapportant aux installations de peu de valeur, faites à l'extrémité de lignes situées dans une région où les orages ne sont pas extrêmement violents ; la seconde se rapportant aux appareils de prix ou d'une délicatesse particulière, dont le remplacement serait difficile et aux lignes en pays très orageux.

Pour la première, il n'y a qu'à maintenir les dispositions actuellement en usage, consistant à placer à l'entrée de poste un *bon paratonnerre à décharge.* Une précaution utile consistera à introduire s'il est possible le fil de terre par la même voie que les fils aériens et si l'installation est faite au simple fil, à rattacher les conducteurs de terre des appareils aux bornes du paratonnerre. Dans ces conditions, le chemin le plus court et le moins obstrué par l'impédance que pourra rencontrer un coup de foudre, se trouvera toujours en dehors des appareils récepteurs.

Pour la seconde catégorie, il sera bon d'employer deux ou trois paratonnerres successifs séparés par une ou deux paires de bobines. Si la communication est bifilaire, chaque conducteur devra être traité de la même façon ; si elle est unifilaire, il sera convenable de faire le montage intérieur au double fil et de prendre la communication au sol par l'intermédiaire des paratonnerres. Ces protecteurs échelonnés devront avoir des degrés de sensibilité croissant de l'extérieur à l'intérieur.

Les installations pourront enfin être complétées par des paratonnerres à fil fusible ou combustible, mais nous réservons cette partie du problème pour une étude spéciale.

33. *Paratonnerres à employer.* — Quel est donc le bon paratonnerre qu'il convient d'employer ? Cela dépend encore de la nature des installations et de l'endroit où elles sont faites. D'une manière générale, on admet que les paratonnerres des bureaux n'ont pas pour but de protéger le personnel, mais seulement le matériel ; il n'y a donc à considérer dans la question que des frais d'établissement ou d'entretien et la régularité de l'exploitation. Un paratonnerre extrêmement sensible qui, au moindre orage, établira une mise à terre, pourra être un excellent protecteur convenant très bien lorsqu'il est à portée d'agents exercés qui le remplaçent dès que le fait se produit ; il sera au contraire détestable dans une guérite ou chez des abonnés, car il paralysera les lignes pour plusieurs heures et donnera lieu à des courses de personnel plus onéreuses que le remplacement de quelques objets détériorés par la foudre. Pour ce

motif, nous pensons qu'il ne convient pas d'exagérer, d'une manière excessive, la sensibilité des protecteurs placés dans les bureaux secondaires, les guérites de raccordement et chez les abonnés au téléphone ; nous estimons également que les paratonnerres à feuille isolante carbonée (papier, gutta-percha, etc...) ne conviennent pas dans ces installations, bien que leur sensibilité soit très satisfaisante, parce qu'ils donnent lieu à des dérangements d'autant plus gênants qu'ils sont parfois intermittents. Dans ces divers cas, nous préférons un appareil à lame d'air. La distance des plaques étant d'autant plus faible qu'on désire obtenir plus de sensibilité ; pour réaliser cette condition, la disposition comprenant une feuille de mica évidée, semble aussi commode que peu coûteuse.

D'après l'étude qui précède, nous sommes nettement partisan des *paratonnerres à air* sous la pression normale à lame mince pour les installations dont le premier choc est suffisamment atténué par des dispositifs protecteurs antérieurs, *à lames plus épaisses* pour les poteaux et guérites de raccordement ou premiers paratonnerres dans le cas où le montage en comporte plusieurs, mais nous ne voyons aucun inconvénient à ce que, dans les mêmes circonstances, on utilise les paratonnerres à pointes ou à stries actuellement fabriqués (Bertsch, etc...) ; le seul changement qui nous paraît s'imposer dans le matériel existant est la proscription des feuilles de gutta-percha et leur remplacement par un mica ajouré.

34. *Observations à recueillir.* — Nous manquons d'expérience au sujet de la valeur relative des paratonnerres à blocs de charbon et à plateaux métal-

liques, et nous estimons que des comparaisons devraient être effectuées pour élucider ce point; il serait intéressant de rechercher, en même temps, si une légère dorure des armatures internes des paratonnerres, qui aurait pour effet d'éviter l'oxydation, sans production de poussière, ne donnerait pas de meilleurs résultats que le charbon. Il y aurait lieu de soumettre à des essais des paratonnerres à vide construits suivant le modèle du *Post Office* et d'après les indications données plus haut, afin de déterminer s'ils peuvent être utilement installés sur les circuits téléphoniques.

Ces observations devraient être faites non plus au laboratoire, mais sur des lignes et circuits situés dans des régions très exposées aux orages, afin d'obtenir une conclusion aussi promptement que possible. L'intérêt qui s'attache à la question nous semble justifier l'établissement de quelques tronçons de lignes spécialement affectées à cet objet; cette étude devrait être confiée à des observateurs convenablement choisis, capables de fournir des renseignements exacts et complets.

L'étude des perturbations électriques de l'atmosphère et du sol et de leurs relations avec le matériel et l'exploitation des lignes télégraphiques et téléphoniques est encore bien incomplète. Elle manque surtout de bases précises, la plupart des faits observés, le sont incomplètement et ne sont pas reliés entre eux. Depuis 1883, à la demande d'un congrès international, les bureaux télégraphiques doivent signaler les coups de foudre qui parviennent à leur connaissance; nous avons dépouillé un très grand nombre de questionnaires remplis dans ces conditions et nous avons pu

constater que les renseignements qu'ils contiennent sont toujours incomplets et fréquemment inexacts; beaucoup sont établis en fin d'année et de mémoire, ils ne sont pas utilisables, même comme éléments de statistisque. Quelques bonnes observations faites par des personnes éclairées et auxquelles on pourrait ajouter foi, vaudraient infiniment mieux que cet amas incohérent.

Dans cet ordre d'idées nous croyons utile de signaler les points qui nous semblent devoir plus particulièrement appeler l'attention des observateurs :

1° *Au sujet des lignes aériennes :* Lorsque la foudre détériore les fils, poteaux ou isolateurs, si l'on peut connaître l'heure précise de l'accident, rechercher si, au même moment, les paratonnerres des bureaux correspondants ont été frappés, si les récepteurs ou sonneries ont éprouvé un choc, si les dégâts se sont étendus à d'autres points de la ligne ou ont affecté des bâtiments; dans ces derniers cas, recueillir, autant que possible, des éléments établissant avec certitude s'il y a eu simultanéité ou non de ces divers accidents.

2° *Au sujet des circuits téléphoniques :* Lorsqu'un appareil relié à un circuit bifilaire est détérioré par la foudre, examiner comment ont fonctionné les paratonnerres installés sur ces deux fils ; rechercher si le montage n'avait aucun point de contact avec le sol, si une communication ne s'est pas établie par un point faible au moment du coup de foudre ; examiner la détérioration produite; rechercher si les conducteurs voisins ont été atteints en même temps.

3° *Sur les câbles souterrains :* Chercher s'il y a une relation entre la fusion des paratonnerres placés sur

les câbles à longue distance et la détérioration des paratonnerres établis sur les lignes aériennes aboutissant au même bureau ; examiner si les coups de foudre frappant les lignes souterraines ne proviennent pas des lignes aériennes elles-mêmes et ne se produisent pas à l'entrée ou au voisinage de l'entrée du bureau ; étudier les installations en s'inspirant de la notion de l'impédance ; recueillir des renseignements sur les coups de foudre éclatant en pleine campagne au voisinage du tracé des lignes souterraines et les rapprocher des observations faites dans les bureaux ; étendre ces observations aux lignes souterraines isolées au papier.

En terminant cette étude, nous croyons devoir faire remarquer qu'elle ne s'applique qu'au danger que présente l'électricité atmosphérique pour le matériel télégraphique et qu'elle ne préjuge rien des dispositions complémentaires que le voisinage de canalisations industrielles rendrait nécessaire.

J. VOISENAT.

ANNEXE

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LES PARATONNERRES A VIDE

Dans l'étude expérimentale qui va suivre, on s'est proposé d'étudier l'influence de la dimension des surfaces en présence, de leur nature et de leur mode de liaison à la source sur leur fonctionnement à différents régimes de la décharge.

A cet effet, on a disposé l'expérience de manière qu'une décharge puisse s'écouler simultanément par deux appareils : le protecteur à étudier placé entre deux bornes fixes et un micromètre formé d'un plateau et d'une pointe mobile, ce micromètre étant relié aux bornes fixes par deux fils de cuivre gros et courts dont la longueur et les dimensions ont été maintenues invariables pendant toute la durée des expériences. La comparaison consistait à régler le micromètre de manière à obtenir la limite où il ne livrait plus passage qu'à une étincelle sur deux décharges frappant le protecteur étudié, et à observer le caractère et la couleur de cette étincelle.

Les connexions ont été successivement disposées de manière à amener sur les appareils soit une décharge brusque, soit une décharge continue, soit enfin à fournir un régime mixte.

1° *Décharge brusque.*

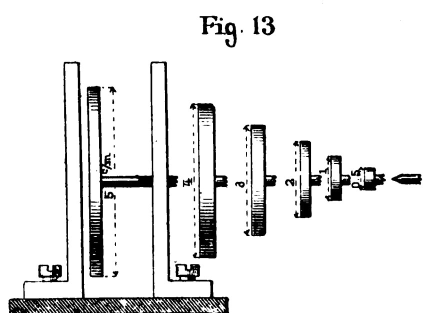
Une série d'expériences préparatoires a été effectuée sous la pression normale avec des appareils semblables au dispositif micrométrique précédemment décrit, la pointe pouvait être remplacée par une tige cylindrique ou par des disques de diamètre plus ou moins grand ; la figure 13 indique la forme de ces organes.

Le résultat obtenu a été conforme à celui des expériences du professeur Lodge citées plus haut.

Toute décharge à l'excitateur A est accompagnée d'une décharge en B ou en B' ou bien en B et en B' simultanément.

Si les fils reliant B et B' sont très courts et rectilignes, si les écartements des armatures sont égaux et si l'état superficiel de ces pièces est identique, les deux appareils sont frappés simultanément; l'étincelle est blanche et brillante dans tous les deux, elle est généralement plus forte dans le premier que dans le second; elle éclate entre deux point quelconques des disques situés à peu près en face l'un de l'autre; les bords ne sont pas particulièrement favorisés. Les étincelles successives ne partent pas du même point, il semble que l'oxydation de la partie atteinte résultant de l'élévation de température agisse comme une augmentation de distance.

Fig. 13



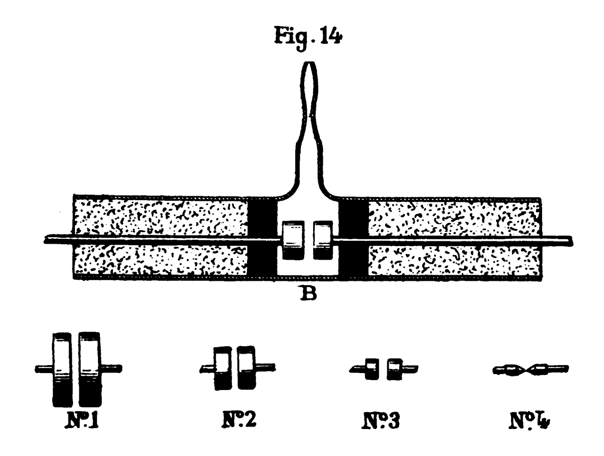
Ces résultats sont indépendants de la forme et des dimensions des armatures en présence. Des disques de plusieurs centimètres carrés sont aussi fréquemment atteints que des tiges de quelques millimètres ou même des pointes situées à la même distance.

Si l'écartement du micromètre B' est plus considérable que celui du protecteur A, on obtient encore en B' quelques étincelles brillantes, généralement plus grêles que dans le cas d'écartement égal, puis des filaments violets, et enfin toute trace de décharge disparaît dans cet appareil. Ces résultats sont d'ailleurs irréguliers; on peut augmenter la distance explosive en B' en éloignant lentement la pointe à partir d'une distance où l'étincelle se produit facilement.

Si au lieu d'installer entre B et B' des fils rectilignes très courts on emploie de longs conducteurs ou des bobines, les étincelles qui apparaissent en B' sont grêles et peu brillantes, elles n'ont plus aucune relation de longueur avec l'écartement des armatures de B; elles peuvent être beaucoup plus longues que cet écartement, mais ne sont plus que des filaments ne produisant aucun bruit, ne représentant plus aucune énergie et qu'on peut dériver à travers les doigts sans ressentir une commotion pénible *et cela quelle que soit*

la forme du premier protecteur, qu'il soit pourvu de grands disques ou de simples pointes.

Comme il n'eût pas été commode d'enfermer ces appareils dans des récipients à vide et d'y amener les connexions on a fabriqué trois dispositifs de forme un peu différente se prêtant mieux à cet objet (*fig.* 14). Ce sont des disques de laiton montés sur des tiges de cuivre et disposés en regard dans un tube pourvu d'une branche permettant d'aspirer l'air. Un bouchon d'ébonite taraudé à l'intérieur maintenait chaque tige et un filetage permettait d'en régler l'écarte-

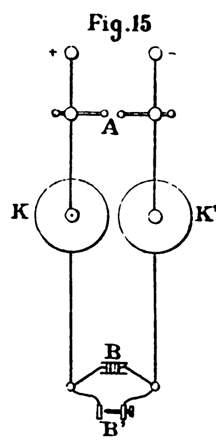


ment après la mise en place. On peut admettre que ce réglage a été effectué avec une précision de $0^{mm}05$. Les extrémités ont été ensuite obturées au moyen de mastic de fontainier fondu.

Ces appareils, rigoureusement semblables comme longueur et grosseur de tiges et comme épaisseur de disques ne différaient que par le diamètre de ces disques. Ils furent successivement placés entre les bornes fixes B de l'installation et soumis à des décharges brusques sous la pression atmosphérique (*fig.* 15); l'excitateur A avait un écartement constant de 2 centimètres, la batterie comprenant deux grandes bouteilles de Leyde. La distance critique déterminée au micromètre B fut d'environ $0^{cm},220$.

DÉSIGNATION de l'appareil B.	DIAMÈTRE des disques B.	ÉCARTEMENT des disques B.	DISTANCE CRITIQUE B' dans l'air.
	cm	cm	cm
N° 1	2	0,200	0,225
N° 2	1	0,200	0,225
N° 3	0,3	0,200	0,220

En raison de l'incertitude qui porte sur l'évaluation de la distance critique — moyenne de plusieurs résultats non identiques — on peut admettre que ces appareils fonctionnent dans l'air de la même façon.



Ils furent successivement reliés à la pompe à mercure et épuisés jusqu'à 2 millimètres. Un accident survenu à l'appareil N° 3 qui amena le rapprochement de ses armatures jusqu'à 0cm,02 empêcha de faire la comparaison complète avec les deux, mais fournit un résultat plus démonstratif encore. L'appareil N° 4 est un peu distinct des précédents. Il est formé de deux électrodes cylindro-coniques d'aluminium soudées à l'extrémité de fils de cuivre de 1 millimètre de diamètre. C'est en réalité un dispontif à pointes peu aiguës.

La distance critique sous diverses pressions est indiquée par le tableau suivant :

On voit que, tandis qu'à l'air libre, un paratonnerre dont les plaques sont à 0cm20 protège à peu près un micomètre relié à sa suite et réglé à 0cm25, le même paratonnerre, dans l'air raréfié, protège moins bien, puisque le micromètre, à une distance presque double, reçoit encore des étincelles blanches et qu'à une distance triple, il est traversé par des aigrettes violettes.

Pour éliminer l'influence de la pointe du micromètre qui n'est pas négligeable, comme l'indique le fonctionnement de l'appareil N° 4, on remplaça ce micromètre par un second appareil semblable à celui dans lequel on avait fait le vide, mais qui demeurait en libre communication avec l'atmos-

phère et qui était pourvu d'une vis permettant de déplacer

B				B'	
DÉSIGNATION de l'appareil.	DIAMÈTRE des armatures.	ÉCARTEMENT des armatures.	PRESSION	DISTANCE CRITIQUE DANS L'AIR étincelle brillante	DISTANCE CRITIQUE DANS L'AIR étincelle violette
			atmosph.	cm. 0,225	»
	cm.	cm.	mm.		
			60	0,225	»
N° 1	2	0,02	8	0,300	0,40
			6	0,400	0,60
			atmosph.		
			mm.	0,225	»
N° 2	1	0,2	100	0,275	»
			60	0,275	0,45
			15	0,300	0,45
			6	0,300	0,6
			3	0,350	0,8
N° 3	0,3	0,2	atmosph.	0,225	»
	0,3	0,02	4 mm.	0,250	0,4
			atmosph.	0,4	0,9
			mm.		
N° 4	0,25	0,2	100	0,4	1,0
			10	0,7	1,4
			2	0,9	1,8

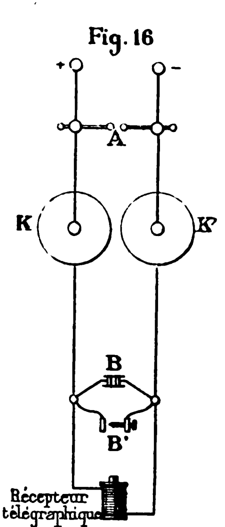
une armature. Le tableau suivant indique la distance critique observée à l'aide de cet apparell B', le paratonnerre expérimenté B étant sous la pression de 4 millimètres.

B			B'	
DIAMÈTRE des armatures	ÉCARTEMENT des armatures.	PRESSION	DIAMÈTRE des armatures.	DISTANCE CRITIQUE dans l'air (étincelles bl.)
cm.	cm.	mm.	cm.	cm. cm.
2	0,180	4	2	0,21 à 0,26
1	0,075	4	1	0,26 à 0,28

Ces observations confirment les précédentes au sujet de l'influence de la raréfaction ; toutefois, on constata que si on

rapprochait les armatures mobiles du micromètre bien au-dessous de la distance critique, l'appareil à vide continuait à être éclairé, bien que la plus grande partie de la décharge traversât le protecteur à mince lame d'air.

Enfin, on a vérifié que tous ces résultats demeurent rigoureusement les mêmes si on relie, d'une manière permanente, les deux armatures des paratonnerres par un circuit métallique d'une certaine longueur, une bobine télégraphique par exemple (*fig.* 16) ; si ce circuit est court il dérive une fraction notable de la décharge; mais, dès qu'il atteint une certaine longueur, quelques mètres, par exemple, la majeure partie s'écoule à travers le paratonnerre. Si ce circuit est constitué par un fil ténu, ce dernier peut suivant sa longueur demeurer intact ou être volatilisé. Enfin, si on emploie un long fil et qu'au voisinage des bornes ses deux extrémités viennent à se rapprocher, une étincelle peut se produire entre elles et occasionner la rupture du fil.



La présence d'un conducteur ne modifie pas le régime de la décharge, elle conserve le caractère oscillatoire et cause ou non du dommage suivant l'efficacité du protecteur et la disposition de l'installation.

Toutes les expériences qui précédent ont été répétées plusieurs fois, en faisant varier la distance A ; les résultats ont été un peu différents en valeur numérique, mais toujours concordants comme sens du phénomène. Ils tendent à prouver qu'un même dispositif de paratonnerre soumis à des décharges brusques se prête un peu moins bien à leur écoulement complet, en d'autres termes protège moins sûrement les appareils voisins, lorsqu'il est placé dans une atmosphère raréfiée que s'il est soumis à la pression normale. Toutefois, la différence de fonctionnement n'est pas considérable et est presque de l'ordre de grandeur des causes perturbatrices qu'on peut rencontrer dans ces expériences.

Il reste à voir comment ces paratonnerres se comportent lorsque le chemin est préparé.

2° Chemin préparé.

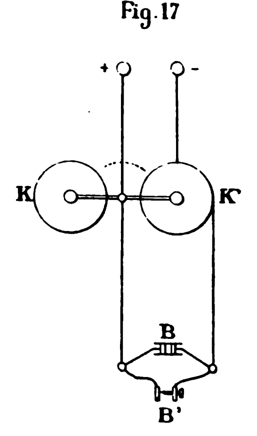
La fig. 17 indique la disposition de l'expérience ; les deux pôles de la machine sont reliés respectivement et en permanence :

1° Avec une batterie de bouteilles de Leyde ;

2° Avec le protecteur à essayer ;

3° Avec un micromètre à pointe.

L'appareil expérimenté est d'ailleurs en communication avec la pompe à mercure.



Sous une pression donnée, on commence par amener le micromètre au contact, puis on l'éloigne progressivement. On constate la formation au micromètre de petites étincelles brillantes, d'abord fréquentes puis un peu plus espacées, à mesure qu'on écarte la pointe du plateau fixe. A partir d'une certaine distance, elles sont remplacées par une aigrette continue, peu colorée et silencieuse. Enfin, pour un éloignement suffisant de la pointe, il peut arriver que le protecteur soit lui-même le siège d'une étincelle, éclatant seule ou se produisant en même temps que l'aigrette. Telle est du moins la marche générale du phénomène tant que la pression dans l'appareil étanche est supérieure à une vingtaine de millimètres de mercure. Jusqu'à ce degré de raréfaction, les décharges dans ce paratonnerre conservent la forme d'une étincelle brillante, étroite, éclatant à la surface des électrodes, entre deux points quelconques à peu près en regard l'un de l'autre et variables à chaque décharge. Pour des pressions inférieures à cette valeur, l'étincelle, tout en partant d'une région peu étendue de l'une des électrodes, semble s'épanouir à la surface de l'autre ; son éclat diminue, elle devient colorée. Vers 8 ou 10 millimètres de pression, elle perd le caractère d'étincelle discontinue pour prendre celui d'effluve continu, enveloppant complè-

tement une des armatures et provoquant une belle phosphorescence de l'enveloppe de verre.

En rapprochant suffisamment la pointe du micromètre, on peut encore obtenir de petites étincelles qui arrêtent complètement la formation des effluves, ou en diminuent simplement l'éclat.

Le tableau ci-dessous indique la distance critique pour différentes pressions avec des électrodes de diverses formes.

APPAREIL ÉTANCHE B		MICROMÈTRE B'	OBSERVATIONS
DÉSIGNATION	PRESSION en millim. de mercure	DISTANCE critique	
		cm.	
N° 1 disques de laiton de 2 cm. à une distance de 0 cm, 2	Normale	0,175	en B étincelle brillante
	520	0,090	
	220	0,030	
	115	0,020	
	50	0,008	
	20	0,004	en B la décharge perd le caractère d'étincelle et prend celui d'effluve.
	10		
	5	0,003	
	3	0,003	
N° 2 disques de laiton de 1 cm. à une distance de 0 cm. 2	Normale	0,175	en B étincelle brillante.
	520	0,090	
	220	0,030	
	115	0,020	
	50	0,012	
	20	0,007	en B la décharge perd le caractère d'étincelle et prend celui d'effluve.
	10	0,006	
	5	0,004	
	3	0,003	
N° 4 électrodes d'aluminium cylindro-coniques à une distance de 0 cm. 2	Normale	0,700	l'étincelle en B' est colorée en forme d'aigrette; en B brillante.
	110	0,130	l'étincelle en B' est blanche et brillante; en B brillante.
	70	0,050	
	40	0,030	l'étincelle en B s'allonge et se colore.
	15	0.020	en B effluve violet enveloppant l'électrode.
	4	0,005	en B effluve violet enveloppant l'électrode.
	2	0,005	en B effluve violet enveloppant l'électrode.

Cette influence de la raréfaction sur le passage de la décharge est connue depuis très longtemps, ainsi que ce qui arrive lorsqu'on pousse le vide plus loin encore, mais au point de vue particulier qui nous occupe ici, il convient de remarquer que si ces décharges continues semblent s'effectuer facilement à travers l'air raréfié, elles ne mettent en jeu qu'une très faible quantite d'énergie ; elles se produisent sous un voltage peu élevé et avec une intensité insignifiante, on peut intercaler le corps humain sur le trajet d'un conducteur presque sans affaiblir l'éclat du phénomène et sans être incommodé.

Il importe d'ailleurs de ne pas perdre de vue que si la décharge s'écoule facilement à travers un appareil à vide imparfait, elle s'écoule plus facilement encore à travers un conducteur même médiocre : si on interpose entre les bornes du paratonnerre une cordelette humide, un fil métallique, une bobine à double enroulement, ou une bobine à grande self-induction ou simplement une installation télégraphique, on dérive la totalité du courant produit par la machine et le paratonnerre ne s'éclaire plus. *Il y a donc lieu de croire que des protecteurs de ce genre seraient sans efficacité pour mettre le matériel télégraphique à l'abri des perturbations électriques présentant un caractère de production continue analogue au débit de la machine statique installée avec ce mode particulier de connexions.*

Dans les conditions expérimentales qui précédent le transport de particules matérielles opéré par les effluves ne constitue qu'une voie de médiocre conductibilité, et si une décharge brusque provenant d'une autre source vient à éclater sur un appareil dans lequel se produit déjà un effluve, celui-ci n'est guère plus favorisé que si l'effluve n'avait pas lieu. Mais si, par une disposition différente, on accroit notablement l'intensité du courant continu, de manière à occasionner un transport matériel plus abondant, on arrive à former une sorte d'intermédiaire entre un conducteur solide et un diélectrique et procédant des propriétés des deux; un pareil système ainsi amorcé est susceptible de transformer en chaleur une notable partie de l'énergie d'une décharge brusque. On peut le réaliser de différentes façons. Nous n'en signalerons que deux qui montreront combien les

circonstances accessoires de l'expérience peuvent modifier les résultats.

3° *Excitation mixte.*

Dans la disposition expérimentale produisant des décharges brusques, on avait soin de réunir en permanence les armatures extérieures par un conducteur médiocre (corde humide) permettant au potentiel de ces armatures de s'égaliser constamment, pendant que celui des deux autres se dénivelle sous l'action de la machine. Si on suprime cette connexion, les deux jarres reposant toujours sur une table en bois sec recouvert de vernis noir, l'égalisation est gênée et le paratonnerre soumis à l'expérience peut présenter pour cette égalisation continue un chemin moins résistant que le support commun. On voit en effet un effluve permanent ou une aigrette le traverser. Dans ces conditions, la distance critique du micromètre diminue et cela dans une proportion d'autant plus grande que la lueur de l'appareil à vide est plus vive.

Fig. 18

Si, modifiant encore la disposition, on dirige les décharges brusques sur les appareils à comparer au moyen d'un excitateur manœuvré à la main (*fig.* 18), on obtient des résultats souvent discordants. Il est facile de constater qu'on favorise le fonctionnement d'un paratonnerre à vide si on remplace la boule *u* par une pointe qui provoque un effluve précédant la décharge disruptive.

On peut enfin, comme l'a fait autrefois M. Lagarde, étudier le fonctionnement des paratonnerres au moyen de la bobine de Ruhmkorff. Ce procédé n'a peut-être guère d'analogie avec le régime des coups de foudre, mais il fournit néanmoins d'utiles indications sur la manière dont se comporterait un paratonnerre à vide recevant une succession de décharges à des intervalles rapprochés de telle sorte que la

traînée métallique résultant des premières ne soit pas entièrement dissipée lorsque les autres éclatent; ce procédé peut d'ailleurs donner une idée de ce qui arriverait à un paratonnerre soumis à l'effet d'une dérivation de courant alternatif provenant d'une canalisation industrielle.

Lorsqu'on relie les deux plateaux d'un paratonnerre aux bornes du circuit secondaire d'une bobine d'induction et qu'on excite celle-ci, il se produit entre les armatures du paratonnerre une série de décharges dont l'ensemble donne l'aspect d'un arc continu, il y a transport de matière d'une électrode à l'autre ; le chemin ainsi préparé acquiert une conductibilité supérieure à celle que produit la décharge d'une bouteille de Leyde. L'énergie du circuit secondaire est transformée, soit en ondulations électriques se propageant dans le milieu ambiant, soit en chaleur élevant la température de l'appareil; l'échauffement du paratonnerre peut donner une idée du degré de protection qu'il offre.

Si on installe côte à côte deux paratonnerres identiques, placés dans des enveloppes de verre, mais disposés de telle sorte qu'on puisse faire le vide dans l'un d'eux, et modifier la distance des armatures dans l'autre, conservé d'ailleurs en libre communication avec l'atmosphère, on constate comme le montre le tableau ci-après que la décharge se partage entre les deux appareils suivant une loi analogue à celle du chemin préparé du cas précédent.

D'autre part, on observe que la température s'élève notablement, aussi bien dans l'appareil à air raréfié que dans celui qui est en libre communication avec l'atmosphère, pourvu que le réglage de celui-ci permette à la décharge de se partager entre les deux voies La production d'effluves n'est donc pas incompatible à la consommation de l'énergie électrique, comme pouvaient le laisser croire les expériences réalisées avec la machine statique.

Si l'on établit entre les amatures de ces appareils une dérivation, au moyen d'un fil conducteur, la décharge choisit ce nouveau chemin et l'étincelle et l'effluve disparaissent. Cependant, en augmentant progressivement la résistance de cette dérivation, on arrive à une valeur qui permet aux paratonnerres de fonctionner. Si la résistance possède de la self-induction, il suffit d'une résistance ohmique moins considérable.

APPAREIL à air raréfié (distance des électrodes, 0cm,2 ; diamètre, 1 centimètre). — Valeur de la pression	APPAREIL A LA PRESSION NORMALE (diamètre des électrodes, 1 centimètre).		
	Distance limite des électrodes à laquelle la décharge traverse exclusivement l'appareil à air raréfié.	Distance moyenne à laquelle la décharge se partage également entre les deux appareils	Distance limite des électrodes à laquelle la décharge traverse exclusivement l'appareil à pression normale.
	centim.	centim.	centim.
normale	0,550	0,200	0,075 (1)
90mm	0,550	0,200	0,050
40	0,188	0,075	0,030
18	0,150	0,050	0,025
10	(2)	0,025	0,012
5	»	0,025	0,010
3	»	0,010	0,006
2	»	0,010	0,003 (3)

(1) A 0,075 on peut provoquer des effluves dans l'appareil à vide en approchant la main.

(2) Le résultat dépend de circonstances accidentelles provoquant l'amorçage; lorsqu'il est commencé, il ne s'arrête qu'en rapprochant les électrodes de l'autre appareil à la limite inférieure.

(3) Même à cette valeur, on a encore des effluves, mais ils sont extrêmement faibles.

En employant une colonne liquide contenue dans un tube en U, on constate que l'appareil à vide sous la pression de 4 millimètres fonctionne dès que la résistance atteint 7.000 ohms, l'appareil en libre communication avec l'atmosphère réglé au même écartement ne donne d'étincelles que lorsque la résistance dépasse 50.000 ohms.

Employant au contraire comme conducteurs les bobines d'un appareil Morse de grande resistance (1000ω) on observe qu'un quelconque des paratonnerres et le récepteur peuvent fonctionner simultanément. Cette simultanéité se maintient encore si, au moyen de colonnes liquides additionnelles, on amène la résistance du circuit à la valeur de 150.000 ohms. A partir de ce chiffre, le courant qui traverse le récepteur n'est plus suffisant pour produire l'attraction de l'armature.

Dans ces conditions expérimentales, la décharge qui traverse l'installation est complexe. La longueur d'étincelle que peut fournir la bobine, étant notablement plus grande

que l'intervalle qui sépare les armatures des paratonnerres, cette étincelle éclate avant le moment de la phase correspondant au potentiel maximum; cette première étincelle donne lieu à des oscillations électriques, mais le transport métallique qui s'effectue dans un espace restreint accroît la conductibilité, et dès lors l'arc est amorcé, la résistance ohmique est suffisamment faible par rapport aux autres éléments (capacité et self-induction) pour que la décharge cesse d'être oscillatoire; le phénomène n'éprouve plus d'autres variations que les alternances produites par le rythme de l'interrupteur de la bobine ou quelques causes accidentelles.

On constate, en effet, au début d'une expérience, au moment où on ferme le circuit primaire, que le paratonnerre à air fonctionne seul, alors même que son écartement est supérieur à la distance des armatures de l'appareil à vide, puis celui-ci s'amorce. C'est donc bien la succession de ce que nous avons obtenu dans les deux régimes précédents. Si on réduit la distance des armatures de l'appareil à air, un nouvel arc se forme entre elles et généralement celui qui existait dans le paratonnerre à vide ne s'éteint pas : on constate alors qui l'écartement dans le premier appareil peut être environ double de celui du second sans que cette simultanéité cesse; mais, que l'un des paratonnerres fonctionne seul, ou que les deux soient traversés par un arc, le récepteur Morse placé en dérivation entre leurs bornes est toujours actionné, comme il le serait s'il s'agissait d'un courant permanent.

CONCLUSIONS

De tout ce qui précède, on peut tirer les conséquences suivantes :

1° Un paratonnerre placé dans l'air raréfié ne présente aucun avantage sur un paratonnerre identique soumis à la pression atmosphérique, en ce qui concerne les décharges à régime alternatif à très haute fréquence.

2° Un paratonnerre à air raréfié placé sur un conducteur communiquant métalliquement à la terre par des appareils récepteurs ne fonctionne pas sous l'action de charges à va-



riation relativement lente. Un paratonnerre ordinaire ne donne d'ailleurs aucun résultat dans ces circonstances.

3° Un paratonnerre à air raréfié soumis à des charges à variations relativement lentes peut fonctionner sous des potentiels moins élevés qu'un appareil semblable sous la pression normale réglé au même écartement.

Par conséquent, tout porte à croire que les paratonnerres à air raréfié ne peuvent présenter sur les appareils à air libre une supériorité sensible que pour les conducteurs parfaitement isolés n'ayant aucune communication avec le sol comme le sont les circuits téléphoniques ou les câbles bloqués par des condensateurs. Toutefois, l'incertitude dans laquelle nous sommes encore du régime des décharges orageuses exige que ces déductions expérimentales soient vérifiées par des observations directes.

J. V.

SUR LE

PHÉNOMÈNE DE L'ARC ÉLECTRIQUE(*)

OU LA PRÉTENDUE F. É. M. DE L'ARC

Dans un précédent travail (**) j'ai fait connaître diverses raisons qui ne permettent pas d'admettre, dans l'arc électrique, l'existence d'une force électromotrice de nature comparable aux forces électromotrices ordinaires, et de même ordre de grandeur que la différence de potentiel entre les crayons. Je me propose aujourd'hui de compléter cette démonstration par les résultats d'expériences exécutées dans ce but, d'après une méthode nouvelle (***).

Cette méthode consiste à interrompre périodiquement, à des intervalles très rapprochés et pendant des instants très courts, le circuit d'un arc alimenté par un courant constant, et à réunir, pendant chaque interruption, les deux charbons à un galvanomètre ; ces opérations sont faites par un commutateur tournant, dont la figure 1 indique la disposition ainsi que le montage des circuits et des appareils.

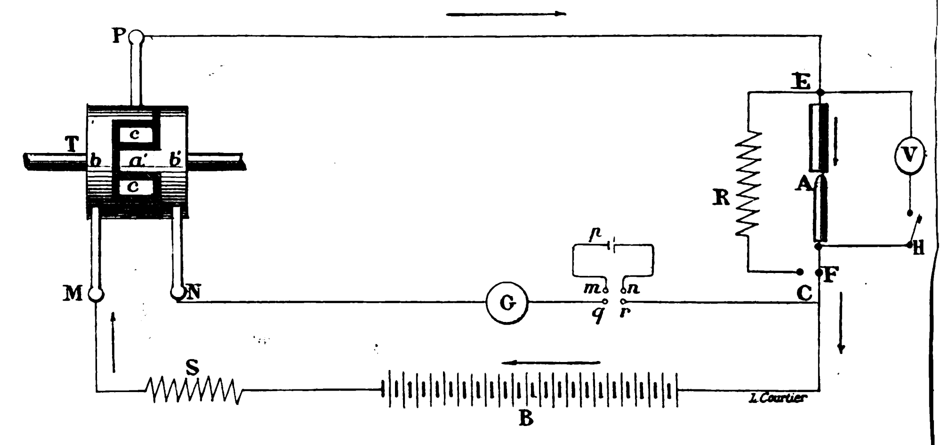
Le commutateur T, entraîné par un moteur à courant continu à vitesse constante, est formé d'un noyau en ébonite sur lequel sont placées deux bagues b et b'

(*) *Comptes rendus*, t. CXXV, p. 164; séance du 19 juillet.

(**) *La Lumière électrique*, t. I, p. 612, 30 septembre 1893.

(***) Travail exécuté au laboratoire central de la Société internationale des Électriciens, avec le concours de M. Letheule, ancien élève de l'École d'Électricité.

en cuivre dont l'une, *b*, est plus large que l'autre ; la bague *b* porte une large échancrure dans laquelle trouvent place une baguette *a* faisant partie de *b'* et deux plaquettes *c c* isolées, également en cuivre. Toutes ces parties sont séparées par de solides isolants en mica, et les balais sont eux-mêmes très bien isolés de leur support par de l'ébonite, de sorte que l'isolement



Disposition des appareils : T, commutateur tournant; M et P, balais principaux : N, balai du galvanomètre; B, batterie d'accumulateurs (70 volts) alimentant l'arc; S, résistance de stabilité sans induction; G, galvanomètre; *p*, élément d'accumulateur; D, commutateur inverseur; C, interrupteur à deux directions; A, arc électrique; E et F, bornes de la lampe; R, résistance sans induction pouvant être substituée à l'arc; V, voltmètre; H, clef du voltmètre.

entre deux quelconques des balais reposant sur le commutateur et entre chaque balai et la terre a toujours dépassé 5 mégohms. Ce commutateur tourne à une vitesse d'environ 40 tours par seconde, et l'échancrure de la bague *b* est d'environ $\frac{1}{5}$ de la circonférence.

La lampe à arc est alimentée par une batterie B

donnant 70 volts de force électromotrice ; le courant traverse successivement une résistance de stabilité S, le commutateur entre les balais M et P par l'intermédiaire de la bague *b*, la lampe EF et l'interrupteur C. A chaque tour il est interrompu pendant $\frac{1}{5} \times \frac{1}{40} = \frac{1}{200}$ de seconde par le passage de l'échancrure de la bague *b* sous le balai P, l'étincelle de rupture se fait sur la pièce isolée *c*. Ces interruptions étant très courtes et très rapprochées, l'arc présente une parfaite stabilité et ne se distingue pas d'un arc ordinaire à courant continu.

Le régime étant bien réglé, on établit une connexion entre *q* et *r*, de façon que l'arc se trouve fermé en court circuit sur le galvanomètre suffisamment sensible (*) pendant chaque passage de la baguette *a* sous le balai P $\left(\frac{1}{600} \text{ de seconde environ}\right)$. Grâce à cette disposition, on n'a pas à craindre l'influence du refroidissement sur les conditions physiques de l'arc pendant l'extinction (**) ni par suite pendant le passage de la languette *a*. S'il y a donc force électromotrice, elle ne peut pas ne pas se traduire par une déviation du galvanomètre et produire une déviation permanente facile à observer.

Une batterie auxiliaire *p* réduite ordinairement à un seul élément et qu'on intercale dans le circuit du gal-

(*) Ce galvanomètre était un galvanomètre Deprez-d'Arsonval différentiel dont l'un des circuits était court-circuité pour assurer une grande fixité du spot. Le circuit utilisé avait une résistance de 128,9 ohms à laquelle on ajoutait en série une bobine qui la portait à 3676 ohms. La résistance de l'arc est négligeable en face de celle-là.

(**) C'est faute d'avoir réalisé cette condition qu'aucun des précédents expérimentateurs n'a donné de solution certaine de la question.

vanomètre dans un sens, puis dans l'autre, permet d'apprécier la valeur de cette force électromotrice en même temps que de vérifier la sensibilité de la méthode ; il suffit, pour cela, de faire deux lectures des déviations ainsi obtenues et de les comparer à celle que donne l'arc seul.

		CAS DE L'ARC					CAS DE LA RÉSISTANCE SUBSTITUÉE.				
		Régime de l'arc (*).		Déviations du galvanomètre.			Régime auquel on soumet la résistance.		Déviation du galvanomètre.		
					Arc avec la pile *p*.					Résist. avec la pile *p*.	
Numéro de l'expérience.	Nature des crayons.	Amp.	Volts aux bornes.	Arcs seul.	sens +.	sens —.	Amp.	Volts aux bornes.	Résistance seule.	sens +.	sens —.
1. . .	A. H.	5	35	7	70	—78	5	34,5	0	71,5	—75
2. . .	H. H.	8	28	1	75	—72	8	27,7	—9,5	66	—83
3. . .	H. H.	10	18	0	75	—73	10	18	—4	73	—78
4. . .	H. H.	8	18	—3,5	73	—75	8	28	—8	67	—82
5. . .	H. H.	11	4	1,3	80	—73	11	4	0,5	76	—73
6. . .	A. H.	7	20	1	73	—73	7	20	1	76	74
7. . .	A. H.	7,5	20	2	71	—74	7,5	20	—3	71	75
8. . .	A. H.	8	18	—5	70	—78	8	17,7	—6	68	79
9. . .	H. H.	8	19	—1	72,5	—77	8,25	17,5	1,2	75,5	73
10. . .	A. H.	6	29	2,5	77	—75	6	29	2,5	77	74

D'autre part, on compare l'arc à une résistance en substituant à la lampe à arc, par la clef C une résistance morte R, prenant sensiblement *même courant et même voltage* et en refaisant la même série de me-

(*) Ces régimes sont les régimes apparents égaux aux $\frac{4}{5}$ des régimes vrais pendant le passage du courant.

sures que sur la lampe, de façon à apprécier en quoi diffèrent les phénomènes observés dans les deux cas.

Le tableau ci-dessus résume quelques unes des séries de chiffres ainsi obtenus, les déviations étant comptées en millimètres de l'échelle transparente à partir d'un zéro repéré chaque fois.

On voit que les deux déviations produites par une force électromotrice de 2,5 volts seulement (force électromotrice de l'accumulateur p) dans le circuit de l'arc sont très grandes par rapport à celles que donne l'arc seul. Ces dernières, ainsi que les différences entre les deux déviations différentes, qui sont de même ordre, ne suivent aucune loi systématique et rentrent dans les erreurs d'expériences ; celles-ci n'ont rien d'exagéré si l'on songe que l'on rompt brusquement un courant d'une dizaine d'ampères à chaque tour du commutateur et que l'isolement de la batterie principale, par rapport au galvanomètre n'est jamais absolument parfait (*). En tout cas, en admettant même que ces déviations soient dues à autre chose que des erreurs, la plus forte de celles-ci, dans le cas de l'arc seul, ne dépasse pas cinq divisions, tandis que la pile donne en moyenne soixante-quinze divisions ; la force électromotrice de l'arc ne pourrait donc dépasser

$$\frac{5}{75} \times 2{,}25 = 0{,}15 \text{ volt.}$$

Il y a loin de là aux 20 ou 30 volts et souvent plus qu'on lui attribue d'ordinaire.

Conclusions. — Il me paraît définitivement établi par ces mesures que l'arc électrique, considéré à un

(*) Il est à remarquer, du reste, que l'isolement ne pouvait introduire que des causes d'erreurs *favorables à l'idée d'une force contre-électromotrice.*

régime donné de courant et de voltage, se comporte sensiblement comme une résistance et ne présente pas de force contre-électromotrice comparable à la différence de potentiel observée ; il n'est donc pas dû à un phénomène d'électrolyse. Au degré de précision obtenu, on peut même assurer que s'il subsiste une force électromotrice résiduelle, due aux effets thermo-électriques par exemple, elle ne saurait dépasser une fraction de volt.

L'arc est, en définitive, *équivalent* à une résistance, sans que cette expérience puisse d'ailleurs permettre de déterminer la *nature* de cette résistance.

A. Blondel.



CHRONIQUE.

Sur la polarisation partielle des radiations lumineuses sous l'influence du champ magnétique.

Note de MM. N. Egoroff et N. Georgiewski.

Depuis la dernière note que nous avons eu l'honneur de présenter à l'Académie dans sa séance du 3 mai, nous avons continué nos expériences et nous sommes arrivés à quelques nouveaux résultats sur lesquels nous nous permettons d'attirer l'attention de l'Académie.

1. L'intensité lumineuse d'un bec Bunsen augmente toujours sous l'influence du champ magnétique.

2. Si l'on observe le spectre de diffraction (réseau plan de Rowland) du sodium d'un brûleur Drummond à l'aide d'un prisme de Wollaston, on peut constater que le champ magnétique polarise partiellement chacune des images dans deux plans perpendiculaires : l'une des images s'élargit très peu, l'autre s'élargit notablement (devient de deux fois à deux fois et demie plus large) et, en même temps, sa partie centrale devient noire. Ce fait a déjà été signalé par M. Zeeman (*).

Si nous réglons la température du brûleur de façon à obtenir, sans mettre en jeu le champ magnétique, le renversement de la partie centrale des raies D_1 et D_2 du sodium, on constate dans le champ magnétique, dont l'intensité n'a pas varié (8.000), que l'une des images du prisme de Wollaston est un peu élargie, tandis que, dans l'autre image, très

(*) *Comptes rendus*, 21 juin 1897.

élargie, on voit apparaître deux raies noires. Ce fait montre l'importance que joue la température dans les phénomènes que nous étudions.

3. Presque tous les métaux dont la partie visible du spectre n'accuse aucune modification dans le champ magnétique (8.000) ont leurs raies spontanément renversables dans la partie ultra-violette de leur spectre. Ce fait nous oblige à rechercher l'influence du champ magnétique sur la partie ultra-violette du spectre.

4. Les raies fines des métalloïdes, obtenues par la méthode de M. de Grammont, restent sans modification dans le champ magnétique.

(*Comptes rendus*, 5 juillet 1897.)

Projet d'une transmission d'énergie électrique de 128 kilomètres de longueur.

Jusqu'alors, nous dit *The Electrical News*, les transmissions de Niagara-Buffalo (42^{km}) et de Odgen-Salt-City ($52^{km},8$) détenaient le record des transports de force à longue distance; cette suprématie ne leur sera plus bien longtemps maintenue, car la Southern California Power Company vient de passer un contrat avec la General Electric Company pour l'équipement d'une ligne dont la longueur est de 80 milles (exactement $128^{km},24$). Cette nouvelle ligne sera trois fois aussi longue et transportera quatre fois autant d'énergie que la ligne de Niagara-Buffalo.

La station génératrice, dont l'emplacement a été choisi à environ 18 kilomètres de Redlands, utilisera les eaux du Santa Ana Canyon qui seront à cet effet dérivées par des canaux et amenées à Bear Creek, point de départ de la conduite forcée longue de 660 mètres qui les amènera finalement aux turbines de la station avec une chute de 225 mètres.

Le matériel générateur prévu se compose de 4 alternateurs triphasés d'une puissance individuelle de 750 kilowatts accouplés à un nombre égal de turbines.

Le courant sera transformé, avant son envoi sur la ligne

en courant à haut potentiel à 33.000 volts. Notre confrère *The Electrician*, de Londres, qui se fait l'écho de cette nouvelle, assure que, quoique des soins spéciaux soient nécessaires dans l'établissement de la ligne pour en assurer l'isolement, la transmission du courant sous un potentiel aussi élevé lui paraît facile à réaliser à l'aide des moyens que l'on possède actuellement.

(*Éclairage électrique*, 4 septembre 1897.)

Un nouveau câble télégraphique souterrain.

L'administration anglaise des Postes et Télégraphes est en train de poser un câble télégraphique souterrain à 76 fils entre Londres et Birmingham, sur une distance de 135 kilomètres. Le câble est isolé au papier et recouvert de plomb. Chaque fil pèse $42^{kg},5$ par kilomètre. On pose le câble dans les tuyaux en fonte de 76 millimètres de diamètre intérieur. Les fabricants et ceux qui se servent de câbles télégraphiques et téléphoniques semblent avoir une grande confiance dans l'emploi de l'air sec pour maintenir l'isolement, et des câbles avec des très grands nombres de conducteurs en résultent. On dit que la *National Telephone C°* a l'intention de se servir d'un câble à 612 conducteurs (306 circuits) pour quelques réseaux métropolitains, et j'ai même vu un échantillon d'un câble à 1.000 conducteurs, d'un diamètre de 90 millimètres fabriqué à titre d'expérience C.

(*L'Industrie Électrique*, 10 septembre 1897.)

Sur la séparation électrolytique du nickel et du cobalt d'avec le fer. Application au dosage du nickel dans les aciers.

Note de M. O. Ducru (*Extrait*).

La séparation rigoureuse du nickel et du cobalt d'avec de grandes quantités de fer présente des difficultés assez nota-

bles; le grand nombre de méthodes publiées jusqu'à ce jour montre qu'aucune solution n'est réellement satisfaisante.

Depuis quelques années les aciers au nickel ont pris dans l'industrie une place importante; une méthode rapide et précise pour la détermination du nickel dans ces alliages, présente donc un certain intérêt. Dans sa magistrale étude sur les *Méthodes d'analyse des fers, des fontes, et des aciers*, M. Ad. Carnot donne la préférence à la méthode de Rothe: cette méthode, imaginée également en France par M. Hanriot, repose sur la séparation, au moyen de l'éther, du chlorure ferrique en solution acide. Dernièrement, M. Pinnera a modifié ce mode de séparation: il emploie, à basse température, de l'éther saturé d'acide chlorhydrique (*).

Il est facile d'arriver au même résultat au moyen de l'électrolyse, en s'appuyant sur la remarque suivante: si l'on précipite par l'ammoniaque en excès une solution ferrique contenant par exemple du nickel, une partie de ce métal reste en dissolution, tandis qu'une proportion notable est entraînée par l'hydrate (**). Toutefois, si l'on soumet à l'électrolyse la liqueur ammoniacale tenant en suspension le précipité, on peut obtenir sur la cathode le dépôt intégral du nickel. La séparation n'est pas absolument rigoureuse: presque toujours une très petite quantité de fer se dépose également sur la cathode: mais, dans des conditions convenables, cette quantité oscille aux environs de 1 mg ou 2 mg, alors que le fer en présence peut atteindre 400 ou 500 mg. Pour des expériences précises, il est donc nécessaire de faire une correction au poids du métal déposé, ce qui se fait facilement par dissolution dans l'acide chlorhydrique et, après peroxydation, précipitation par l'ammoniaque.

L'emploi de la solution nitrique qui, dans des conditions analogues, a permis à M. Riche (***) de séparer le cuivre du fer, présente certains inconvénients. Il en est de même de la solution chlorhydrique. On obtient de bons résultats en opé-

(*) E. Pinnera, *Comptes rendus*, t. CXXIV, p. 124. 1897.

(**) Cette proportion s'élevait à 27 p. 100 pour le nickel, à 48 p. 100 pour le cobalt, dans des expériences rapportées par Baumhauer (*Archives néerlandaises*, t. IV. 1890). Elle peut, dans certains cas, être encore plus considérable.

(***) *Annales de chimie et de physique*, 5e série, t. XIII, p. 528. 1878.

rant sur la solution sulfurique, additionnée de sulfate d'ammoniaque. Voici le mode opératoire :

La solution contenant le nickel et le fer au maximum, additionnée, s'il y a lieu, d'un léger excès d'acide sulfurique, est évaporée à sec. On reprend par le moins d'eau possible, on ajoute 5 à 10 grammes de sulfate d'ammoniaque et l'on chauffe jusqu'à l'obtention d'une liqueur limpide. Cette liqueur est versée, en agitant, dans le creuset de l'appareil de M. Riche, dans lequel on a placé 60 à 70 cm³ d'ammoniaque concentrée. On procède alors à l'électrolyse.

On emploie, comme source d'électricité, deux ou trois accumulateurs en tension, de manière à régler entre 1,5 et 2,5 ampères l'intensité du courant de début (*). Dans ces conditions, en moins de quatre heures, le nickel est entièrement déposé.

Dosage du nickel dans les aciers. — On attaque 250 à 300 mg par l'eau régale, dans une capsule de porcelaine. L'attaque terminée, on ajoute 1 cm³ d'acide sulfurique et l'on évapore à production de fumées blanches. On continue ensuite comme ci-dessus.

L'expérience montre qu'il est utile de séparer le silicium et le carbone ; les petites quantités de manganèse et de phosphore que renferment les aciers, non plus que la présence du chrome, n'empêchent pas l'emploi de la méthode, mais on retrouve à peu près constamment sur la cathode des traces de manganèse avec celles de fer.

Pour obtenir une correction exacte, on précipite à la fois les deux métaux, en ajoutant, comme l'a indiqué M. Ad. Carnot, un peu d'eau oxygénée à la solution du métal déposé, sursaturant par l'ammoniaque et portant à l'ébullition. Comme les coefficients de transformation $\frac{Fe}{Fe^2O^3} = 0,700$ et $\frac{Mn}{Mn^3O^4} = 0,721$ sont assez voisins, on ne commet pas d'erreur appréciable en appliquant l'un quelconque d'entre eux à un poids d'oxyde d'environ 2 mg. C'est ainsi qu'ont été obtenus les nombres de la colonne *Correction*.

Il y a lieu enfin de remarquer que, quoique en minime proportion, le fer déposé sur la cathode se trouve à deux états différents. En dissolvant le métal déposé sur la cathode par l'acide chlorhydrique étendu et chaud, on obtient une solution qui renferme des traces de fer. D'autre part, il sub-

(*) Soit 25 à 45 milli-ampères environ par centimètre carré pour la partie utile de la cathode, en supposant, comme première approximation, la densité du courant uniforme.

siste un très faible résidu noir qui ne s'attaque pas par l'acide chlorhydrique, même concentré, mais qui se dissout à l'ébullition lorsqu'on ajoute un peu d'acide azotique; la solution dans l'eau régale de ce résidu noir donne les réactions des sels ferriques. La faible quantité que j'ai pu en obtenir (environ 0,4 mg au maximum) ne m'a pas permis d'en pousser plus loin l'étude.

J'ai, enfin, constaté qu'il suffit d'une très faible proportion d'acide chromique, dans une solution ammoniacale de nickel pour empêcher le dépôt électrolytique du métal, qu'il y ait ou non du fer en présence. Je me propose de revenir ultérieurement sur ce point.

(*Comptes rendus*, 13 septembre 1897.)

Distribution électrique de l'heure

Pontarlier va bientôt avoir des cadrans électriques partout, jusque dans les plus petits magasins et chez les particuliers. La municipalité, en effet, offre des abonnements à l'heure électrique de la ville à qui veut en prendre.

L'abonnement est de cinq ans au minimum et partira du 1er janvier 1898. Le prix de l'abonnement est fixé à 12 fr. par an et payable d'avance.

L'établissement du fil jusqu'à la maison de l'abonné est à la charge de la ville. Par contre, toute l'installation intérieure est à la charge de l'abonné.

Aperçu des prix : horloges d'intérieur à simple ou à double cadran spécialement destinées aux bureaux, salles publiques, magasins, hôtels, ateliers, etc.

Diamètre	du cadran	0,20 c ;	cadre uni,	prix	55 fr.
—	—	0,25	—	—	66
—	—	0,35	—	—	90
—	—	0,35	cadre orné	—	105
—	—	0,40	cadre simple	—	110

Port et emballage en sus.

Le coût de l'installation peut varier, suivant le cas, de 10 à 20 fr. au maximum.

(*L'Électricien*, 16 oct. 1897.)

Sur la tension au pôle d'une bobine d'induction (*).

On mesure le potentiel maximum atteint entre les pôles d'une bobine à l'aide d'une méthode dont le principe est emprunté aux observations de Recht sur l'effluve : une pointe laisse écouler l'électricité dès que son potentiel atteint une valeur déterminée.

Une sphère de 5 centimètres de diamètre est chargée à un certain potentiel; en face se trouve une pointe en communication avec un électromètre. Si la pointe est trop éloignée de la sphère, l'électromètre reste au zéro; en la rapprochant progressivement, il arrive un moment où l'aiguille de l'électromètre subit une déviation qui se maintient lorsqu'on l'éloigne.

On dresse un tableau contenant les potentiels de la sphère (mesurés à l'électromètre) et les distances de la pointe auxquelles on observe la première déviation appréciable. On admet que la même correspondance a lieu si l'on charge la sphère par la bobine munie de son interrupteur; on justifie cette extension par plusieurs raisons.

Pour étendre la méthode aux potentiels trop élevés pour être mesurés à l'électromètre, on admet que le potentiel de la pointe est le même que celui produit par la sphère isolée au point qu'elle occupe; cette hypothèse conduit à ce résultat que le potentiel pour lequel l'écoulement de l'électricité par la pointe commence n'est pas constant à 1/4 près; de pareils écarts semblent nécessiter une étude approfondie du phénomène.

On démontre expérimentalement que, pour une bobine donnée et un mode d'interruption déterminé du courant primaire, il existe un rapport constant entre les différences de potentiel maximum atteintes entre les extrémités du secondaire et les bornes du primaire.

K. Swyngedauw.

(*Journal de Physique*, décembre 1897.)

(*) Analyse d'une note de M. A. Oberbeck, dans les *Wiedemann's Annalen*.

Attitude des gaz raréfiés dans des espaces métalliques presque fermés à l'intérieur d'un champ à haute fréquence (*).

Tandis qu'une cage en fil métallique à mailles étroites ne se laisse pas traverser par les décharges électriques dans l'air à la pression ordinaire, il en est tout autrement quand elle se trouve dans un gaz rarefié au point d'être rendu lumineux par les oscillations.

Dans un vase cylindrique en verre, renfermant un gaz raréfié on dispose une cage cylindrique en toile métallique à mailles étroites. Pour une basse pression, on observe à la base cathode du tube l'espace obscur et la lueur caractéristique de la cathode, et à la base anode, la colonne lumineuse stratifiée positive; en même temps on voit sur la base de la cage tournée vers l'anode une lueur cathodique et dans la cage une couche rouge de lumière positive, étroitement serrée contre la base tournée vers la cathode et ayant absolument le même aspect que les couches positives de l'anode.

Quand la pression diminue, cette lumière positive se détache de plus en plus de la base tournée vers la cathode et finalement flotte librement à l'intérieur de la cage sous forme d'une masse lumineuse fondue.

Enfin, si l'on pousse le vide très loin, la lumière disparaît à l'intérieur de la cage.

Ainsi donc les décharges peuvent pénétrer à l'intérieur du grillage comme si celui-ci n'existait pas.

Cette pénétration, à la base tournée vers l'anode, en particulier, se fait sous forme de petites aigrettes bleues dirigées vers l'intérieur et correspondant à des rayons cathodiques secondaires.

Pour de hautes pressions on ne voit plus de lumière que sur la base de la cage tournée vers la cathode; c'est une lumière bleuâtre, présentant un aspect rougeâtre vers l'intérieur. Mais il suffit alors, pour obtenir l'illumination à l'inté-

(*) Analyse d'un article de MM. H. Ebert et E. Wiedemannn, dans les *Wiedemann's Annalen*.

rieur de la cage, de produire de plus fortes oscillations ou bien encore de constituer les bases du tube de verre par des lames métalliques et de les relier directement aux extrémités du système de fil Lecher.

Les auteurs, en modifiant de différentes façons la disposition expérimentale, ont toujours observé les phénomènes précédents, avec quelques variantes. En particulier, quand l'intervalle entre la cage et l'une des extrémités du tube est très resserré, l'illumination intérieure ne se produit plus que très difficilement.

H. BAGARD.

(*Journal de Physique*, décembre 1897.)

Nécrologie.

M. LAGARDE.

Les *Annales télégraphiques* viennent de perdre un de leurs plus anciens et plus fidèles collaborateurs. M. Joseph Lagarde, Inspecteur-Ingénieur des Télégraphes en retraite, est décédé presque subitement, à Paris, le 30 novembre dernier, à l'âge de 68 ans.

Né en 1829, à Longuebrousse (département de l'Aveyron), M. Lagarde fit ses études à Paris et fut admis à l'École polytechnique au mois d'octobre 1848. Il en sortit en 1850 avec le brevet de sous-lieutenant d'artillerie; mais, ne se sentant pas la vocation militaire, il donna immédiatement sa démission et fut professeur libre de mathématiques. Sans doute, l'exercice de cette profession ne lui donna pas les satisfactions sur lesquelles il comptait, car, en 1852, il sollicita et obtint, en qualité d'ancien élève de l'École polytechnique, son admission dans le service des Télégraphes.

C'était le début de la télégraphie électrique et le jeune fonctionnaire fut immédiatement employé à la construction et à l'entretien des lignes aériennes. Il prit part ainsi à l'établissement du réseau dans la région de l'ouest et fut attaché

successivement aux résidences de Brest, Lorient, Vannes et Angers.

Dès ses débuts, M. Lagarde s'adonna à l'étude des questions techniques et, pendant tout le temps de sa carrière, il ne cessa de se tenir au courant des travaux des savants français et étrangers sur l'électricité et les applications de cette puissance nouvelle.

Appelé à Paris en 1857, il remplit diverses fonctions dans les services actifs ou à l'Administration centrale. En 1861, il était placé à la tête du service télégraphique du département de l'Indre. Il fut, peu de mois après, rappelé à Paris, qu'il n'a plus quitté depuis cette époque.

Dans les dernières années de l'administration de M. de Vougy, c'est-à-dire jusqu'à la guerre de 1870, M. Lagarde fut chargé de diriger la construction des lignes souterraines qu'on substituait aux lignes aériennes dans la traversée des grandes villes. Ses connaissances techniques l'avaient fait désigner pour ces missions importantes qu'il a su toujours remplir avec succès.

Au mois de septembre 1870, sous la direction de M. Richard, il prit part, avec le regretté camarade Raynaud, à la pose d'un câble dans la Seine entre Paris et Rouen. On se rappelle comment cette précieuse communication, à peine établie, fut coupée par l'explosion du pont de Saint-Cloud. Lagarde n'ayant pu rentrer à Paris fut employé, par la délégation du Gouvernement de la Défense Nationale, à Tours et à Bordeaux et, dès que les services furent réinstallés, en 1871, il revint à Paris, où il fut chargé de la réception et de la vérification du matériel.

Il est resté, depuis cette époque, constamment à la tête de ce même service qui prenait, chaque année, une plus grande importance, au fur et à mesure du développement des exploitations télégraphiques et téléphoniques. On peut dire que Lagarde a trouvé, dans l'exercice de ces délicates fonctions, sa véritable voie : par son intégrité incontestée, par la droiture de son caractère aussi bien que grâce à ses qualités techniques et à ses persévérantes études, il a rendu à l'Administration des services très réels et très appréciés.

En 1872, il avait été nommé chevalier de la Légion d'hon-

neur et, certainement, il serait arrivé au plus haut rang de la hiérarchie administrative s'il avait su corriger ses allures un peu trop rustiques et s'il n'avait pas été constamment rebelle aux usages et aux exigences de la vie mondaine.

En 1895, il sollicita son admission à la retraite qui lui fut accordée, sur sa demande, à partir du 1er octobre de la même année.

Mais c'était un laborieux; il travaillait encore après avoir résigné ses fonctions et, l'année dernière même, le journal *le Correspondant* publiait, sur la télégraphie aérienne et sous-marine, trois articles très remarqués que notre ami Lagarde n'avait voulu signer, modestement, que d'un pseudonyme : J. de Roc.

Sa collaboration aux *Annales télégraphiques* date de l'origine même de cette publication. Depuis 1885, il nous a donné de nombreux articles, résultat de ses travaux personnels et de ses propres expériences.

La liste complète des études dues à M. Lagarde serait trop longue pour être reproduite ici, mais nous rappellerons à nos lecteurs les recherches qu'il a principalement développées dans ce recueil :

Études sur la résistance d'isolement et la capacité des isolateurs télégraphiques;

Expériences sur les paratonnerres, dont la conclusion faisait ressortir la supériorité des paratonnerres à air;

Expériences relatives à la composition chimique et au pouvoir isolant de la gutta-percha, lesquels ont conduit l'Administration à fixer, dans ses cahiers des charges, un maximum d'isolement;

Et, enfin, de nombreuses recherches sur la conductibilité des métaux (en particulier du cuivre et du bronze) et sa variation avec la température. Les résultats numériques obtenus par M. Lagarde sur cette dernière question ont été consacrés par une longue pratique et figurent, dans tous les traités spéciaux, au nombre des données techniques dont les ingénieurs électriciens ont à faire usage.

La mort est venue le surprendre au moment où il avait entrepris d'autres travaux. Ses obsèques ont été célébrées à Saint-Sulpice au milieu d'un nombreux concours d'amis et

d'anciens collègues, tous unanimes à reconnaître la droiture et l'élévation de son caractère et à rendre justice à cette carrière dignement et laborieusement remplie.

Pour nous, qui avons pu l'apprécier plus particulièrement dans l'intimité, il nous est doux d'ajouter, à ce général témoignage d'estime, que, sous sa rude enveloppe, Lagarde cachait une âme d'élite, qu'il était dévoué, affectueux, discret, généreux envers les pauvres, et qu'il avait la main largement ouverte aux bonnes œuvres.

E. Lorin.

25.4.58

L'Éditeur-Gérant : Vve Ch. Dunod.

PARIS. — IMP. E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.



ANNALES

TÉLÉGRAPHIQUES

Année 1898 Mars-Avril

LA TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

PAR ONDULATIONS ÉLECTRIQUES

La presse quotidienne a fait savoir, au cours de l'année dernière, qu'un inventeur italien, M. Marconi, avait trouvé le moyen de télégraphier sans employer de fils conducteurs. Il résulte, en effet, d'expériences effectuées en Angleterre et en Italie et reproduites dans plusieurs autres pays, qu'on a pu transmettre à travers l'espace libre, à une vingtaine de kilomètres, et même dépasser cette distance, dans certaines circonstances spéciales. De là, à imaginer qu'on parviendrait facilement à traverser l'Atlantique et à conclure que, dans un avenir éloigné, les câbles sous-marins, les lignes télégraphiques et les circuits téléphoniques deviendraient inutiles, il n'y avait qu'un pas, et quelques chroniqueurs n'ont pas hésité à le franchir.

La presse scientifique, à son tour, décrivant les



procédés employés et consignant les résultats obtenus par M. Marconi, a ramené les prévisions à des proportions plus modestes et montré comment la disposition utilisée découlait des travaux de Hertz; elle a enregistré les revendications formulées par plusieurs savants qui ont découvert les propriétés utilisées et réalisé avant lui les appareils employés par M. Marconi; elle a enfin reproduit les arguments fournis par celui-ci, pour faire apprécier l'importance de son travail personnel.

D'après certains auteurs, M. Marconi n'aurait absolument rien inventé : son mérite, en la circonstance, aurait exclusivement consisté à lancer dans le grand public et dans les sphères gouvernementales, et cela, au moyen d'une habile réclame et de hauts patronages, des procédés entièrement connus, décrits dans des publications remontant à plusieurs années et déjà considérés comme classiques, dans l'enseignement des Universités. Peut-être cette polémique n'eût-elle pas atteint le caractère aigu auquel elle est arrivée si, connaissant davantage les antériorités de la question, M. Marconi n'eût revendiqué, comme lui étant propres, les procédés et les appareils dont il est question et s'il se fût borné à faire breveter leur utilisation à la transmission des signaux.

Nous allons exposer l'historique du problème, en nous tenant exclusivement sur le domaine scientifique et en dehors de toute considération de propriété industrielle et de validité de brevets, c'est-à-dire en nous basant seulement sur l'ensemble des documents publiés tant en France qu'à l'étranger. On en déduira facilement la part qui revient aux savants et aux praticiens, au sujet de cette application particulière.

I

DIVERS PROCÉDÉS DE TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE SANS FIL CONDUCTEUR

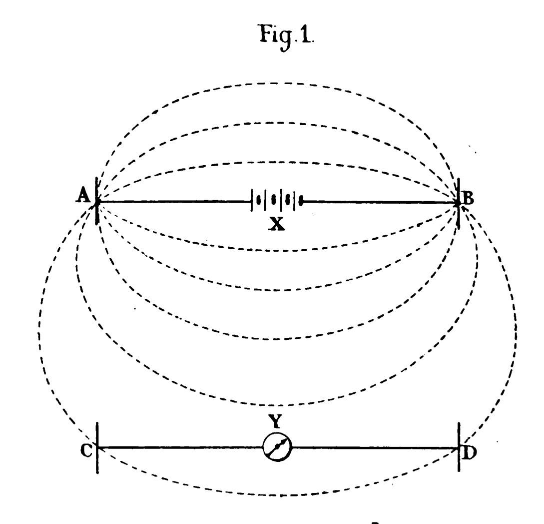
Remarquons d'abord que l'expression de *télégraphie sans fil*, par laquelle on désigne le procédé Marconi, prête un peu à l'ambiguïté, puisque le système Chappe et toutes les dispositions, plus ou moins pratiques qui ont été proposées avant lui, ne comportaient pas l'emploi de l'électricité et, par suite, ne nécessitaient pas de conducteurs; il en est de même des appareils optiques utilisés pour la télégraphie militaire, et, en fait, le système Marconi se rapproche beaucoup plus de la télégraphie optique, par les moyens qu'il emploie et par les services qu'on peut en attendre, que de la télégraphie électrique, telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui; la dénomination qui convient à ce système est celle de *télégraphie sans fil continu*, *par ondulations électriques*.

Il serait peut-être prématuré, à l'éclosion de ce système, de prétendre formuler les limites qu'il ne saurait dépasser; mais si l'on s'en tient aux faits acquis et aux analogies immédiates, on peut considérer que la télégraphie par fils conducteurs demeure encore le seul système susceptible d'une exploitation régulière, économique et à grand rendement, permettant d'échanger, dans un nombre indéfini de directions, des communications, sans indiscrétion ni confusion, et cela à une distance illimitée. Les autres procédés ne peuvent être considérés que comme des expédients utilisables dans les circonstances exceptionnelles qui s'opposent à l'établissement ou au main-

tien d'un fil métallique. Les essais tentés dans ce sens, au moyen de l'électricité, se rapportent à trois genres de phénomènes : *conductibilité par les diverses couches du sol; induction électrostatique; induction électromagnétique.*

Communication par le sol. — Considérons deux plaques A et B (*fig.* 1), enfouies dans le sol, à une certaine distance l'une de l'autre. Relions-les par un

Fig. 1.



fil conducteur dans lequel nous placerons une pile. Le circuit se fermera par les diverses couches conductrices du sol, et des plaques C et D, enfoncées à une certaine distance, prendront, du fait de la pile, une certaine différence de potentiel; si on les relie par un conducteur contenant un galvanomètre, cet appareil indiquera le passage d'un courant, lorsque la pile sera en activité, et reviendra au repos si l'on ouvre son circuit au moyen d'un interrupteur. On

conçoit qu'on puisse, par ce procédé, établir entre deux points X et Y une communication électrique, alors même que ces stations sont séparées par un obstacle ne permettant pas de les relier par un fil continu; mais la mise en application comporte de sérieuses difficultés.

Réalisé avec un certain succès, dès 1831, par J.-B. Lindsay, repris depuis par divers expérimentateurs et notamment par M. Bourbouze, en 1871, qui se proposait de faire communiquer Paris investi avec la province, au moyen du cours de la Seine, ce procédé n'a donné de résultat qu'à une distance peu considérable et au prix des plus grands efforts.

Il convient d'ailleurs de remarquer, qu'à cette époque, on était assez mal outillé pour mener tout à fait à bien une pareille entreprise, c'est-à-dire pour réaliser une installation permettant, non pas d'échanger quelques vagues signaux, mais d'assurer, à l'abri de toute erreur, une correspondance suivie.

On ne disposait, en effet, comme récepteur de haute sensibilité, que de galvanomètres à équipage astatique, revenant lentement au zéro, exposés à dévier sous la moindre perturbation magnétique et donnant la même indication sous l'action d'une perturbation que d'un courant de travail. Pour assurer la réception des signaux, il eût fallu employer des appareils apériodiques à indications très rapides permettant de les répéter ou, mieux encore, des récepteurs décelant le rythme du courant et différenciant nettement un signal d'une perturbation.

Expériences faites en Autriche et en Allemagne. — L'extrême sensibilité des récepteurs téléphoniques

et surtout leur aptitude à déceler des différences de ce genre offraient la possibilité d'effectuer les expériences qui précèdent avec plus de commodité et de chances de succès. C'est ce qui, d'après M. Hugo Wietz (*), a été fait en Autriche et en Allemagne. Les essais autrichiens (1880-1890) n'ont pas été publiés, pour des raisons d'ordre militaire.

Des expériences analogues furent faites, sur la demande du Gouvernement allemand, par l'*Allgemeine Electricitæts Geselschaft* : on put échanger des signaux très distincts sur le *Van See*, près de Postdam, à une distance de 4.500 mètres. L'emploi de courants alternatifs de diverses fréquences permettait d'établir plusieurs communications simultanées avec des appareils convenablement accordés. Les signaux acoustiques reçus pouvaient d'ailleurs être tranformés en signaux imprimés par un enregistreur photographique dû au docteur Rubens.

Malgré le succès relatif de ces essais, on doit considérer ce procédé comme n'étant applicable qu'à des cas particuliers assez restreints.

Transmission par induction électrostatique. — Deux conducteurs isolés dans l'espace agissent l'un sur l'autre, par influence électrostatique; les variations de charge de l'un d'eux peuvent être décelées sur l'autre si leur rapidité et leur intensité sont en rapport avec la sensibilité dont on dispose. Des essais de transmission à distance ont été tentés, par ce moyen, en employant comme récepteur, un galvanomètre ou un téléphone et, comme transmetteur, une bouteille de Leyde ou une bobine de Ruhmkorff.

(*) *Zeitschrift für Electrotechnik*, 1er avril 1895.

En particulier, Édison, qui, vers 1874, a cherché par divers procédés à réaliser la transmission sans fil, a eu recours à cette méthode. Il employait, comme armatures s'influençant mutuellement, des ballons captifs métallisés à la surface et reliés aux appareils par un câble conducteur. Les résultats obtenus dépendaient beaucoup de l'état hygrométrique de l'atmosphère. Ils ne furent pas jugés suffisants.

Transmission par induction électromagnétique. — Un téléphone relié à un conducteur d'une certaine longueur, se prête particulièrement bien à la perception des variations rapides de l'état électrique d'un fil voisin. On sait que cette grande sensibilité a été considérée, au début de la téléphonie, comme un véritable obstacle à l'utilisation simultanée de plusieurs fils voisins. Lorsque deux lignes unifilaires ont un parcours parallèle de quelques kilomètres, on perçoit sur l'une toutes les conversations échangées sur l'autre, alors même que la distance qui les sépare atteint une centaine de mètres; avec un écartement plus grand encore, on peut déceler des courants plus puissants : une transmission télégraphique, par exemple. Cette particularité, qui oblige à constituer les lignes téléphoniques au moyen de deux fils posés en hélice, peut être utilisée pour communiquer d'un point à un autre, non plus en reliant ces deux stations par un fil continu, mais en disposant, auprès de chacune d'elles, une ligne transversale unifilaire, dans laquelle on place le récepteur téléphonique et un générateur avec une clef. Au lieu d'employer des fils rectilignes, mis à la terre aux deux extrémités, on peut utiliser des cadres circulaires ou rectangulaires

convenablement orientés et réaliser ainsi des dispositions convenant à chaque cas particulier.

C'est ainsi qu'en 1892 M. Preece réussit à communiquer à travers le canal de Bristol (3,3 milles anglais) au moyen d'un fil placé sur chaque rive; la source employée était une pile de 100 éléments Leclanché, pourvue d'un rhéotome effectuant 260 interruptions par seconde. En 1895, ce procédé fut réellement utilisé, sur une distance d'environ 5 milles, pour assurer la communication télégraphique de l'île de Mull, dont le câble avait été rompu et ne pouvait être réparé immédiatement.

On essaya de constituer, par ce moyen, une communication permanente entre certains feux flottants et la côte. Les câbles télégraphiques utilisés dans ce but sont très rapidement rompus par l'agitation des flots. On forma une sorte de couronne, au fond de la mer, en immergeant plusieurs spires d'un câble relié au rivage, et, l'on constitua une seconde couronne en enroulant un autre conducteur autour du bateau-phare. Le procédé ne donna satisfaction que lorsque la mer n'avait qu'une faible profondeur : avec six brasses d'eau on pouvait entendre la parole dans les téléphones; avec 15 brasses, la communication télégraphique était excellente; à une profondeur plus considérable, elle devenait difficile; à 200 brasses, elle était tout à fait impossible.

Le procédé Édison, dont on a beaucoup parlé, il y a une dizaine d'années, permettant de faire communiquer une station avec un train en marche, repose sur le même principe. C'est encore une ligne fixe, longeant la voie, qui agit sur un conducteur tendu parallèlement et transporté par le train. Il n'y a au-

cune difficulté théorique, mais l'application ne présente peut-être pas toute la sécurité qu'on attendait de ce système.

Photophone. — Rappelons enfin qu'on a proposé le photophone pour la transmission télégraphique sans conducteur. Quoique ce procédé n'ait donné lieu à aucune application utile, car il est encore plus limité par la distance et l'opacité de l'atmosphère que la télégraphie optique ordinaire, il mérite d'être cité ici, car son principe se rapproche beaucoup de celui qui nous occupe.

L'organe essentiel du photophone est un morceau de sélénium, substance isolante en temps ordinaire, qui devient instantanément conductrice, sous l'action des radiations lumineuses, et qui perd cette propriété dès que l'excitation disparaît.

Le système télégraphique se compose d'une plaque de sélénium reliée par deux électrodes à une pile et à un téléphone, et disposée dans une monture qui permet de l'exposer aux rayons lumineux envoyés par la station correspondante. Un dispositif produisant des interruptions très rapides du faisceau lumineux provoque et fait disparaître la propriété conductrice et par suite donne lieu à un courant discontinu qui fait vibrer la plaque du téléphone.

La transmission consiste à démasquer la source pendant un temps court ou long, de manière à produire, dans le téléphone, un son bref ou prolongé, c'est-à-dire à former deux signaux distincts correspondant au point et au trait du code Morse.

Le procédé Marconi repose sur un principe identique : il comprend un organe qui, comme le sélénium,

est isolant en temps ordinaire, et qui est rendu conducteur par des ondulations transmises à travers l'espace; mais ces ondulations sont électriques, tandis que dans le photophone elles sont lumineuses. Il y a d'ailleurs certaines analogies entre ces deux genres d'ondulations.

II

Expérience de Hertz. — Dès 1864, Maxwell montra qu'il était possible d'expliquer les phénomènes lumineux en les considérant comme des cas particuliers de l'électromagnétisme. Comme, d'ailleurs, toutes les expériences déduites de la théorie de Fresnel prouvent que les manifestations lumineuses sont dues à des vibrations mécaniques d'une fréquence extrêmement considérable, si la manière de voir de Maxwell est fondée, on doit pouvoir réaliser, au moyen de l'électricité, des phénomènes vibratoires présentant les caractères généraux qu'on rencontre en optique.

C'est ce qu'a montré expérimentalement Henri Hertz en 1888.

Aucun dispositif mécanique ne permettant d'obtenir des variations électriques d'une rapidité comparable à celle des vibrations lumineuses (400 à 800 trillions par seconde), Hertz eut recours à une propriété découverte en 1847 par Helmholtz, vérifiée expérimentalement par Feddersen, et dont la théorie complète a été donnée plus tard par Lord Kelvin : l'oscillation de la décharge de la bouteille de Leyde.

Lorsqu'on décharge un condensateur de capacité C, dans un circuit de résistance R et de self-induction L,

le courant ainsi produit est continu si ces éléments satisfont à l'inégalité

$$R > \sqrt{\frac{4L}{C}};$$

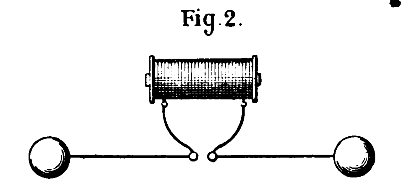
il est alternatif dans le cas contraire, et la durée de la période d'oscillation est

$$T = \frac{\pi\sqrt{CL}}{v},$$

v étant la vitesse de propagation électrique. L'amplitude des oscillations décroît, d'ailleurs, suivant la même loi que celle d'un diapason ébranlé par un choc et dont le mouvement n'est pas entretenu.

L'expression de T montre que la durée d'une vibration est d'autant plus courte que la capacité et la self-induction sont moindres. Les condensateurs à grande surface employés dans la télégraphie et même les bouteilles de Leyde des laboratoires ont une capacité trop considérable et ne conviennent pas pour la production d'ondes très rapides. Hertz employait (*fig.* 2) un système de deux sphères reliées respectivement à deux petites boules par un conducteur rectiligne assez court. L'étincelle oscillatoire éclatait entre les deux boules. Pour obtenir des vibrations continues, il recourait à un artifice analogue à celui qu'on emploie pour entretenir les diapasons ; il renouvelait à chaque instant l'impulsion électrique; à cet effet, il reliait les deux grandes sphères aux bornes d'une bobine

Fig. 2.



de Ruhmkorff qui, à chaque alternance du courant induit, renouvelait leur charge.

L'ébranlement électrique ainsi produit se propage, à travers l'espace, suivant toutes les directions, comme le ferait une émission sonore. On peut constater cette propagation, à distance, au moyen de résonnateurs appropriés. Hertz montra que ces ondulations traversent les milieux isolants, se réfléchissent, se dispersent et se réfractent partiellement à la surface de séparation de deux milieux différents, sont complètement arrêtées par une faible couche conductrice, peuvent donner lieu à des interférences, etc.

Le résonnateur employé par Hertz consiste en un fil métallique, courbé en cercle et terminé à ses extrémités par deux petites boules très rapprochées, entre lesquelles se produisent des étincelles quand l'orientation est convenable.

Sans insister davantage sur les conséquences philosophiques des expériences de Hertz et des savants qui ont complété ses travaux et précisé quelques points de théorie, nous indiquerons certaines modifications apportées aux ondulateurs et plusieurs procédés utilisés, concurremment avec le résonnateur de Hertz, pour déceler les oscillations électriques.

Ondulateurs. — Dans la construction de son oscillateur, Hertz avait surtout songé à réaliser un appareil dont la forme se prêtât aux calculs qu'il avait en vue. Il présente plusieurs inconvénients et, lorsqu'on ne poursuit pas le but spécial que se proposait Hertz, il y a avantage à prendre une disposition différente. Les étincelles qui éclatent, entre les petites boules de laiton, oxydent et rendent rugueuses les surfaces; le

fonctionnement devient irrégulier et il faut les polir très fréquemment. MM. Sarrazin et de la Rive ont fait disparaître cet inconvénient en plaçant ces boules dans un récipient contenant de l'huile d'olive.

M. Righi a montré qu'un liquide isolant augmentait notablement la puissance d'un ondulateur. A l'huile d'olive, il préfère l'huile de vaseline, convenablement épaissie par l'addition de vaseline. Son ondulateur se compose de deux sphères métalliques; chacune est encastrée dans un cadre d'ébonite; une enveloppe de parchemin, entourant ces cadres, constitue un récipient étanche dans lequel se trouvent les deux hémisphères en regard; le liquide isolant est versé dans cette cavité. Le système est excité par deux boules situées à l'extérieur, de part et d'autre, et ayant pour axe le diamètre commun.

M. Righi attribue l'augmentation de puissance d'un ondulateur contenant de l'huile à ce que le potentiel nécessaire pour qu'une étincelle parte dans ce liquide est beaucoup plus élevé que pour une couche d'air de même épaisseur; l'énergie de cette étincelle est donc plus considérable. En outre, l'huile de vaseline régularise la production d'étincelles et il n'est plus indispensable de polir fréquemment les boules ; même après un long usage, lorsque le liquide est devenu très noir et qu'un dépôt de carbone s'est formé sur les sphères, le fonctionnement est encore satisfaisant; le liquide organique s'oppose vraisemblablement à l'oxydation rapide du métal.

M. Righi montra, enfin, que les boules pleines donnent des résultats plus puissants que des sphères creuses et qu'on peut, avec elles, produire des oscillations qu'on perçoit à une distance presque double

de celle qu'on peut atteindre avec des boules creuses de même diamètre et de même écartement.

Il est d'autant plus facile de mettre en évidence les analogies existant entre les vibrations lumineuses et les oscillations électriques que la longueur d'onde de ces dernières est plus petite; les grandes longueurs d'onde nécessiteraient des appareils d'une dimension exagérée. Hertz paraît n'avoir jamais produit d'ondulations ayant moins de 66 centimètres de longueur. On sait qu'il a démontré la réfraction des ondes électriques au moyen d'un bloc prismatique d'asphalte qui avait $1^{m},50$ de côté. Avec des sphères de petit rayon, M. Righi est arrivé à produire des ondes de $2^{cm},5$. Des travaux analogues ont été effectués, à Calcutta, par le professeur Chunder Bose, au moyen d'un ondulateur formé par trois petites billes de platine; en réduisant suffisamment le diamètre de ces billes, M. Bose a pu produire des ondes de 6 millimètres. A l'heure actuelle, on paraît avoir réalisé des ondes inférieures à 1 millimètre. Il n'est pas commode d'expérimenter à ces limites extrêmes; mais, en se tenant un peu au-dessus, on peut encore opérer sur des échantillons de petites dimensions et avec des appareils qui se montent sur un banc d'optique. Ces ondulateurs sont donc extrêmement intéressants au point de vue de la démonstration, dans les cours, ou des recherches de laboratoire, mais ils ne se prêtent pas à l'emploi de sources électriques puissantes; ils ne comportent, par suite, que la mise en œuvre d'une médiocre quantité d'énergie et, *pour le moment du moins*, semblent convenir moins bien que les appareils de plus grandes dimensions, pour l'émission d'ondes perceptibles à grande distance.

Différents modes de déceler les ondulations électriques. — La forme donnée par Hertz au résonnateur n'est nullement obligatoire; cet appareil peut être formé de deux conducteurs distincts, séparés par un petit intervalle d'air; plus cet intervalle est étroit, plus l'indicateur est sensible. M. Righi, mettant à profit cette observation qu'une étincelle éclate plus facilement entre deux conducteurs en contact avec un isolant qu'entre deux électrodes en liberté complète dans l'air, fabrique des résonnateurs très sensibles, au moyen de minces bandes de glace argentée, dont le métal a été rendu discontinu par un sillon léger tracé au diamant. Placé dans l'obscurité, cet indicateur décèle la présence d'ondulations à une distance notable du centre de production.

MM. Sarrasin et de la Rive ont montré qu'il n'y a pas, entre l'ondulateur et le résonnateur de Hertz, le rapport simple que celui-ci avait supposé tout d'abord; l'ondulateur semble ne pas produire des oscillations d'une seule tonalité. Lorsqu'un ondulateur un peu puissant est en activité, on peut tirer de petites étincelles de tous les corps conducteurs situés dans son voisinage, en approchant d'eux un conducteur de médiocres dimensions. Ce fait est bien connu; il ne prouve pas qu'une certaine longueur de résonnateur ne soit préférable à toute autre pour déceler les ondulations produites par un ondulateur déterminé, mais il montre que l'action des oscillations électriques s'étend à des corps qui n'ont pas de rapport simple de dimensions avec ceux qui répondent à la tonalité propre de cet instrument.

On a d'ailleurs recherché l'action des oscillations

électriques sur les substances et les appareils les plus variés. On a trouvé que, de même qu'elles étaient sensibles aux radiations lumineuses, les plaques photographiques et les piles thermo-électriques sont actionnées par les rayons électriques ; que le bolomètre est influencé par elles, comme par la chaleur rayonnante, etc.

Les radiations électriques sont, en outre, susceptibles de produire certains phénomènes qui leur sont propres, parmi lesquels nous citerons la faculté curieuse d'amorcer le passage d'une décharge électrique.

Illumination des tubes à vide. — Zehnder a montré que, si les électrodes d'un tube à vide sont reliées aux pôles d'une pile, aucun courant ne traverse l'appareil, mais que le tube s'éclaire, sous l'influence du courant de cette pile, lorsque le tube est frappé par des oscillations électriques.

Boltzmann a provoqué, par le même procédé, la charge d'un électroscope, à travers un conducteur présentant une très étroite solution de continuité. En temps ordinaire, une pile, reliée à un électroscope par un semblable conducteur, ne provoque aucune déviation des feuilles d'or, mais elle le charge dès que des oscillations électriques sont produites dans le voisinage du tube. Cette action représente vraisemblablement le phénomène élémentaire de l'influence des ondulations sur la conductibilité des corps pulvérulents que nous allons examiner.

Recherches de M. Branly sur l'influence des ondulations électriques sur la conductibilité de certaines

substances en contact imparfait. — En 1890 et 1891, M. Branly, professeur à l'Université catholique de Paris, publia plusieurs mémoires sur la modification de conductibilité qu'occasionnent diverses influences électriques dans certaines substances présentant des contacts imparfaits.

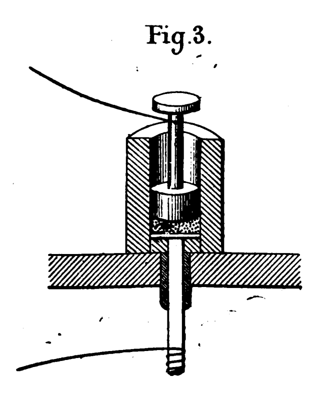
Les couches métalliques minces, déposées chimiquement sur des plaques isolantes, les grenailles, limailles, poudres de substances conductrices, etc., présentent, sous cette forme, une très médiocre conductibilité; souvent leur résistance se chiffre par plusieurs mégohms. Si l'on vient à faire éclater, sur elles ou dans leur voisinage, des étincelles électriques, ou, mieux encore, si l'on produit la décharge d'un condensateur, leur résistance s'abaisse brusquement et peut tomber à quelques ohms. La conductibilité ainsi acquise se conserve pendant un temps plus ou moins long, suivant la nature et l'état de division des substances; les trépidations et diverses actions physiques facilitent le retour à la grande résistance primitive; un choc la rétablit instantanément.

M. Branly a fait une étude complète de la question en opérant sur des corps très variés. Il a découvert dans quelques-uns des anomalies. Il a déterminé l'influence de la compression des substances, de leur état de division, de leur agglutination par certaines résines, de leur suspension dans les liquides isolants, etc.

La disposition qu'il employait le plus souvent consistait à introduire la substance à étudier dans un petit tube d'ébonite (fig. 3) fermé par deux pistons métalliques servant d'électrodes et sur lesquels il exerçait une pression graduée; il faisait les mesures au pont de Wheatstone.

M. Branly a observé les variations de conductibilité occasionnées par diverses formes d'excitation électrique : petites étincelles produites par l'approche d'un corps électrisé par frottement, aigrettes d'une machine statique, étincelles d'une bobine de Ruhmkorff, électrisation d'un point du circuit par contact avec une armature de la bouteille de Leyde, passage d'un courant induit dans la substance sensible, passage d'un courant de force électromotrice élevée. Entre tous ces moyens, il signale, comme particulièrement efficace, *la décharge oscillatoire d'un condensateur*.

Fig. 3.



M. Branly avait été précédé dans cette voie par un professeur italien, M. Temistocle Calzecchi-Onesti, qui, en 1884 et 1885, a publié, dans le *Nuovo Cimento*, les résultats qu'il avait obtenus.

Ayant disposé, dans un tube de verre, une petite quantité de limaille de cuivre, entre deux électrodes de laiton, il constata, au moyen d'une pile et d'un galvanomètre Wiedemann que, suivant son degré de tassement, la poudre était conductrice ou isolante et que ce dernier cas présentait de curieuses particularités. Au circuit, comprenant déjà les organes indiqués, il ajoutait un téléphone et un commutateur permettant d'éliminer, à volonté, le tube à limaille et le galvanomètre et de les remplacer par un court-circuit. Ceci préparé, il constatait, au moyen du galvanomètre, que le tube ne livrait passage qu'à un courant

très faible. Il introduisait alors le court-circuit : un choc, produit dans le téléphone, indiquait le passage d'un courant assez intense. Enlevant, enfin, le court-circuit et rétablissant le tube et le galvanomètre, il constatait que le système était devenu conducteur. Il montra, d'ailleurs, que cet effet était dû à l'extra-courant d'ouverture, prenant naissance dans la bobine du téléphone. Il vérifia le fait, avec diverses poudres, et reconnut que certaines d'elles devenaient conductrices, sous l'action de cette simple étincelle d'extra-courant, tandis que d'autres ne pouvaient être modifiées que par l'action plus puissante d'une machine statique.

L'étude de M. Branly a porté sur des formes beaucoup plus variées que celle de Calzecchi; elle a surtout mis en évidence le fait que les excitations électriques pouvaient modifier la conductibilité de certains corps, non seulement lorsqu'elles s'exercent au voisinage immédiat d'un point du circuit, *mais aussi à distance*, sans aucun intermédiaire apparent; enfin elle a signalé l'action des décharges oscillantes.

Travaux de M. Lodge. — M. Lodge a montré tout le parti qu'on pouvait tirer des tubes de M. Branly, pour l'étude de la propagation des oscillations hertziennes, qu'on faisait jusqu'alors par des procédés moins sensibles. Il semble attribuer exclusivement à ces oscillations la propriété d'orienter, d'agréger, de *cohérer*, suivant son expression, les substances pulvérulentes, pour leur donner la conductibilité. Il a montré que cette conductibilité pouvait être attribuée à une soudure des diverses particules, faite sous l'action de l'étincelle minuscule jaillissant entre deux parcelles

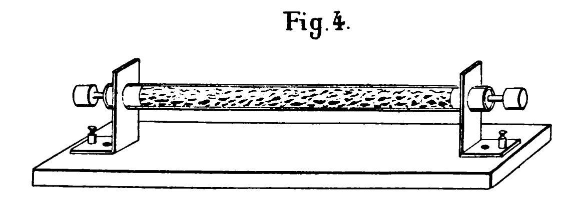
voisines, mais séparées par une très mince couche d'oxyde ou par un très petit intervalle d'air. On sait, en effet, que lorsqu'une étincelle éclate entre deux pièces métalliques très voisines, elle en provoque fréquemment la soudure. M. Branly ne partage pas complètement la manière de voir de M. Lodge et trouve impropre le nom de *coherer* donné au tube à limaille par le savant anglais; il propose celui de *tube radio-conducteur* qui rappelle la cause et l'effet qu'elle produit. Sans indiquer de préférence relativement à l'explication du phénomène, nous emploierons, par la suite, le mot *cohéreur*, parce qu'il est déjà en usage et parce qu'il est plus court.

M. Lodge employa le tube à limaille, depuis 1893, tant pour ses recherches de laboratoire que pour montrer les propriétés des ondes hertziennes dans son cours, à l'Université de Liverpool. Son dispositif comprend un cohéreur, une pile et un galvanomètre périodique. En temps ordinaire, cet appareil n'indique qu'un faible courant, mais la déviation augmente brusquement dès que le cohéreur reçoit des ondulations électriques. Entre certaines limites, l'écart du galvanomètre peut donner une idée de l'intensité de l'excitation électrique. La déviation demeure d'ailleurs acquise et ne disparaît que si l'on imprime un léger choc au cohéreur pour restaurer son isolement.

Les tubes de M. Branly étaient des appareils de recherches, lui permettant de comparer des substances diverses dans des conditions identiques de compression et d'excitation ou d'étudier une même substance dans différentes conditions et sous des influences électriques bien définies. Les cohéreurs de M. Lodge sont des instruments invariables, servant à déceler les ondes

électriques et à mesurer plus ou moins grossièrement l'intensité. Parmi les diverses formes qu'a données M. Lodge à cet indicateur, la plus fréquemment employée est représentée par la *fig.* 4; c'est un tube

Fig. 4.



d'une dizaine de pouces de longueur, rempli de copeaux métalliques et pourvu d'un fil de connexion à chaque extrémité; ce tube est soit en libre communication avec l'atmosphère, soit scellé après raréfaction.

Sous cette forme, le cohéreur peut être rapproché des microphones à grenaille de charbon; M. Lodge a aussi construit un dispositif d'une grande sensibilité, mais d'un emploi moins commode, qu'on peut comparer au microphone à un seul contact de Hughes : il se compose d'une aiguille à coudre reposant par sa pointe sur une plaque d'aluminium. En temps ordinaire, le système n'est pas conducteur, mais les ondulations électriques effectuent la liaison des deux pièces métalliques soit par soudure réelle, soit par déchirure mécanique ou réduction chimique de la pellicule d'oxyde qui les sépare (*).

(*) Pour compléter ces analogies avec le microphone, il convient encore de citer les dispositifs réalisés par M. Branly consistant à préparer de petites pastilles avec les poudres métalliques et un agglomérant isolant (soufre, paraffine, etc.); bien que les particules métalliques soient presque immobilisées par leur véhicule, elles sont susceptibles de devenir conduc-

Dans ses expériences, M. Lodge décohérait soit à la main, chaque fois qu'il était nécessaire, soit au moyen d'un dispositif automatique commandé par l'instrument lui-même. Puisque celui-ci devient conducteur, on peut lui faire fermer le circuit d'une sonnerie à trembleur dont le marteau frappe sur le tube pour produire la décohésion. M. Lodge, qui a tout d'abord essayé cette disposition, a reconnu qu'elle présentait un inconvénient : les étincelles d'extra-courant, qui se produisent dans la sonnerie à chaque rupture du circuit par l'oscillation de l'armature, excitent le tube, comme dans les expériences de Calzecchi, d'où il résulte que lorsque le cohéreur a été agrégé une première fois par une cause quelconque, le jeu de la sonnerie qui devrait détruire cette agrégation peut, par suite d'un effet secondaire, la rétablir indéfiniment. M. Lodge fut conduit à opérer la rupture du circuit de la sonnerie, à une certaine distance du cohéreur, puis à s'affranchir complètement de cette sujétion, en provoquant l'ébranlement du tube au moyen d'un mouvement d'horlogerie. La variation de conductibilité s'observait alors au galvanomètre.

Les expériences qu'effectuait alors le professeur de Liverpool l'amenèrent à déceler, à l'aide du cohéreur, des oscillations électriques à une quarantaine de mètres de l'excitateur. Dans une conférence faite à Oxford, en 1894, à la réunion de l'Association britannique, il a exposé les appareils qui lui avaient servi dans ces recherches; il a même émis l'opinion que cet appareil ne cesserait guère de fonctionner

trices sous l'excitation électrique. Au début de la téléphonie, on a employé plusieurs microphones à pastilles qui fonctionnaient suivant un mécanisme semblable.

qu'à la distance d'un demi-mille, mais il s'empressait d'ajouter qu'il n'avait fait aucune expérience pour déterminer cette limite.

Depuis la publication des résultats obtenus par M. Marconi, M. Lodge s'est plaint, avec quelque amertume, que le Post-Office anglais ait cru demander, au Parlement, un crédit de 15.000 francs pour faciliter au jeune Italien la mise en œuvre de moyens qu'il avait fait connaître, trois ans auparavant, et qu'on avait alors négligés. Il est hors de doute que l'éminent professeur était capable de trouver une bonne solution de ce problème s'il avait pensé qu'il fût utile de le résoudre et s'il avait songé à l'attaquer. Le mérite de M. Marconi est précisément d'avoir eu cette foi et d'avoir su attirer l'attention générale sur l'emploi qu'on pouvait faire, pour la télégraphie, d'instruments qui n'avaient jusqu'alors servi qu'à des recherches scientifiques. Nous verrons plus loin qu'en réalité M. Marconi avait été précédé dans cette voie, mais il convient d'abord d'indiquer une application des cohéreurs qui remonte à plusieurs années.

Emploi des cohéreurs pour l'étude de l'électricité atmosphérique. — Dans une étude magistrale sur les paratonnerres, faite vers 1888, M. Lodge a montré que les coups de foudre devaient présenter le caractère des décharges oscillatoires à haute fréquence; de nombreux effets du tonnerre, demeurés incompréhensibles, s'expliquent, en effet très facilement, d'après cette théorie. Si cette manière de voir est exacte, les cohéreurs doivent indiquer les coups de foudre qui éclatent à une certaine distance. C'est ce que plusieurs observateurs ont constaté. Parmi eux, on peut citer

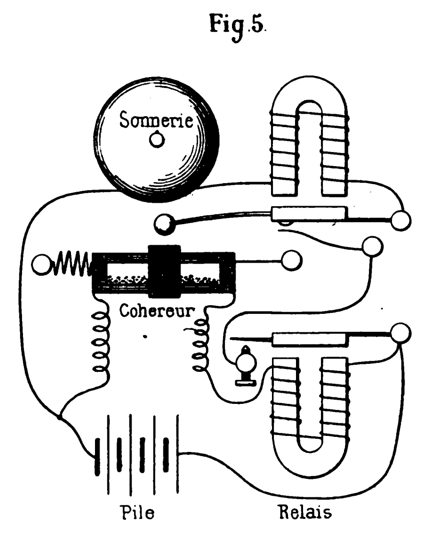
M. Popoff, professeur à l'École de la marine de Cronstadt, qui, en 1895, a appliqué les dispositifs de Lodge à l'étude des oscillations électriques de l'atmosphère et M. Jervis-Smith qui, en 1896, a étudié la marche de plusieurs orages, au moyen d'un cohéreur à poudre de charbon.

M. Jervis-Smith place, dans un tube d'ébonite, du charbon provenant de la réduction, en poudre impalpable, de filaments de lampes à incandescence. Une vis de réglage permet de comprimer cette substance, jusqu'à ce que l'ensemble présente une légère conductibilité. Mis en circuit avec une pile et un galvanomètre à miroir, cet appareil peut fonctionner d'une manière continue, sans qu'il soit nécessaire de le décohérer; à chaque coup de foudre, le spot du galvanomètre fait un saut et se fixe sur une autre division de l'échelle. Le cohéreur de M. Smith était installé sur une table, dans une salle dont les portes et les fenêtres étaient closes; il n'avait pas de communication avec le sol, l'oscillation électrique produite par le coup de foudre l'atteignait néanmoins.

Dans un long mémoire publié par le *Journal de la société physico-chimique russe* (octobre 1895) et résumé dans l'*Elektritchestvo* de Saint-Pétersbourg (juillet 1896), M. Popoff indique différentes recherches de laboratoire, faites par lui, au cours de 1895, au moyen des tubes Branly, avec la disposition expérimentale de M. Lodge. Son installation représentée *fig*. 5 comprenait un cohéreur, une pile et un relais; ce relais, lorsqu'il était actionné par le courant de la pile, fermait le circuit d'une sonnerie à trembleur, dont le marteau frappait sur le cohéreur. Une double enveloppe métallique mettait ce dernier

appareil à l'abri des perturbations extérieures et de celles produites par les étincelles du trembleur; une fenêtre étroite servait à la réception des ondes qu'il s'agissait d'étudier.

Fig.5.



M. Popoff utilisa cette disposition pour observer l'électricité atmosphérique. A cet effet, il reliait l'une des électrodes du cohéreur soit à une tige de paratonnerre, soit à un fil de bronze sortant du laboratoire horizontalement et se relevant ensuite verticalement le long d'un mât; l'autre électrode était attachée à une conduite d'eau. Pour obtenir des indications graphiques, il établissait, à l'aide du relais, une seconde fermeture de circuit, à travers un enregistreur Richard.

Cette installation contient l'élément capital du succès de M. Marconi, dans ses essais de transmission télégraphique : l'emploi d'une *communication avec le sol* et d'un *fil collecteur s'élevant à une certaine hauteur* (*). M. Popoff a d'ailleurs procédé, à cette époque, au moyen de son dispositif, à des essais de

(*) Le fil explorateur avait déjà été utilisé pour recueillir dans l'espace les oscillations hertziennes. M. Minchin d'une part, M. Rutherford d'autre part, l'avaient employé. Ces expérimentateurs ne faisaient pas usage de cohéreurs, comme appareils indicateurs.

correspondance télégraphique qui lui ont donné des résultats encourageants. Les conclusions de son mémoire font ressortir les services que peut rendre son installation, pour l'étude des orages, et pour la transmission des signaux; elles indiquent cependant la nécessité d'y apporter quelques perfectionnements et de recourir à un générateur d'oscillations électriques d'une puissance suffisante.

III

Nous connaissons maintenant tous les organes dont se compose le système télégraphique que M. Marconi a fait breveter en 1897. Il les assemble de deux manières différentes : l'une servant à la démonstration du principe et l'autre à la communication à longue distance. La première rappelle l'installation isolée employée par M. Jervis-Smith pour observer les orages; la seconde comprend le collecteur et le fil de terre de M. Popoff et presque tous ses appareils de réception.

Poste de démonstration. — Au poste transmetteur (*fig.* 6) se trouvent :

1° Un ondulateur de Righi A, porté par un cadre d'ébonite et pourvu de deux sphères excitatrices reliées aux bornes du fil secondaire de la bobine;

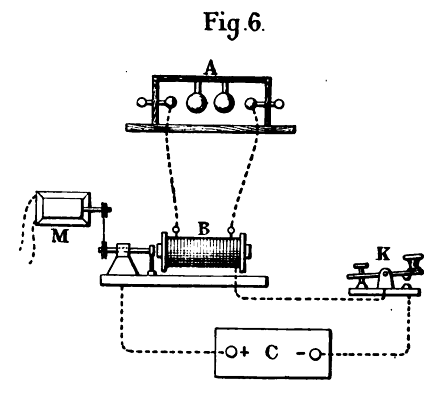
2° Une bobine de Ruhmkorff B;

3° Une batterie d'accumulateurs C;

4° Une clef Morse K, placée sur le trajet du circuit primaire de la bobine.

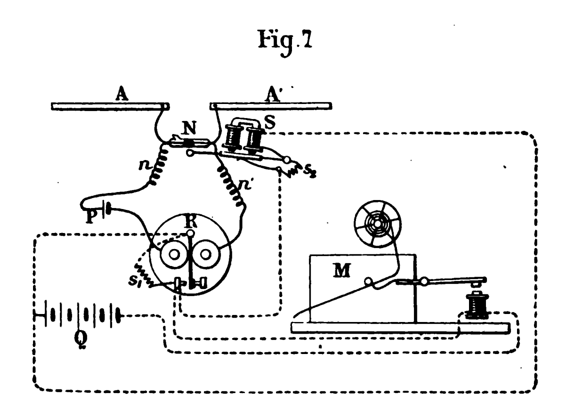
Au moyen de la clef, on peut fermer le circuit de la

batterie, pendant un temps plus ou moins long : un contact court donne naissance à une succession d'ondes de courte durée ; un contact prolongé occasionne un mouvement ondulatoire de longue durée. Ce sont les deux signaux élémentaires du code Morse : le *point* et le *trait*.



Au poste de réception se trouvent (*fig.* 7) :

1° Un cohéreur N, pourvu ou non d'ailettes métalliques renforçatrices ;



2° Un élément de pile sèche P, un relais du Post-Office R et deux bobines de réactance, *n* et *n'*, en circuit avec le cohéreur ;

3° Un récepteur Morse M et une pile locale Q dans le circuit de travail du relais;

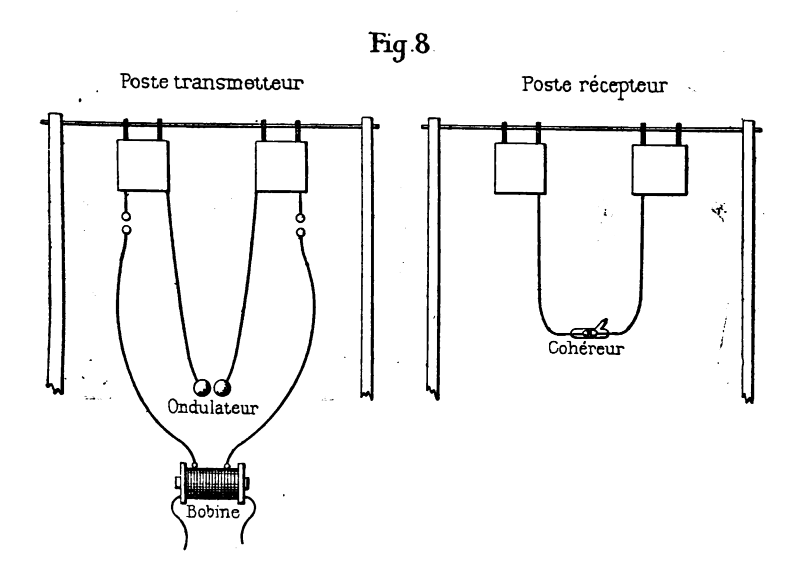
4° Un trembleur électrique S, également actionné par le relais, lorsqu'il est dans la position de travail.

La pile sèche représente une force électromotrice de 1,5 volt. Le relais, employé par M. Marconi, a une résistance de 1.000 ohms; il est réglé de manière à fonctionner avec un courant de 1 milliampère. Or, en temps ordinaire, le cohéreur présente une résistance de quelques mégohms; l'intensité du courant qui traverse le relais est donc négligeable; mais il suffit que la résistance du tube s'abaisse à 400 ou 500 ohms pour que le relais fonctionne.

C'est, en effet, ce qui se produit si la source ondulatrice est suffisamment puissante et si les deux postes ne sont pas trop éloignés. On constate que, avec un ondulateur donné, actionné par une bobine de moyennes dimensions alimentée par trois accumulateurs, le système fonctionne à quelques dizaines de mètres du transmetteur, le cohéreur étant employé seul, tandis qu'on peut franchir quelques centaines de mètres si le tube est pourvu d'ailettes métalliques; malgré cet artifice, la portée est donc encore très restreinte. La limite qu'on ne peut dépasser, par ce procédé, est donc bien de l'ordre de grandeur (un demi-mille) qu'avait indiqué, *à priori*, M. Lodge à la réunion d'Oxford.

On peut, il est vrai, la reculer un peu en donnant aux ailettes une plus grande largeur, en les transformant en volets métalliques et en munissant le poste transmetteur d'appendices semblables, raccordés directement aux boules excitatrices ou séparés d'elles par un petit intervalle d'air (*fig.* 8). Cependant, même

avec cette disposition, la portée demeure assez restreinte et le procédé ne pourrait guère être considéré comme un système pratique de télégraphie. Pour franchir des distances correspondant à une utilisation réelle, il faut ne conserver à chaque poste qu'un seul volet, l'exhausser notablement au-dessus du sol et remplacer l'autre par une communication à la terre, c'est-à-dire employer la disposition de M. Popoff.



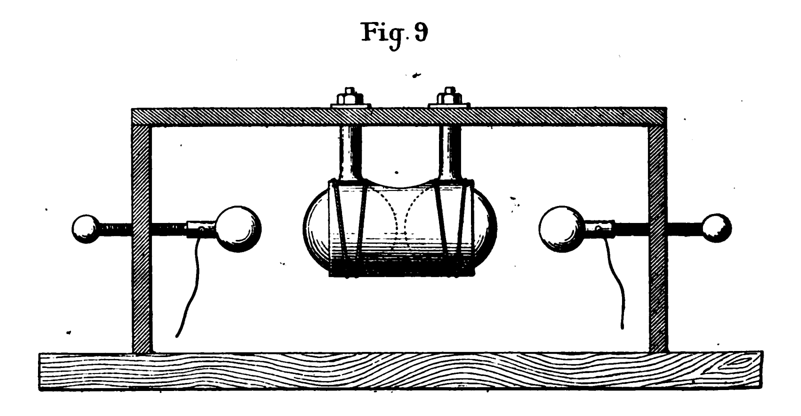
Modifications apportées par M. Marconi aux appareils existants. — M. Marconi a apporté aux appareils réalisés avant lui certaines appropriations pour le but qu'il poursuivait.

Les bobines d'induction de grandes dimensions exigent des précautions spéciales pour fonctionner régulièrement pendant une durée soutenue; malgré la présence du condensateur destiné à atténuer l'étincelle

d'extra-courant du circuit primaire, celle-ci est encore notable et détériore rapidement les contacts de l'interrupteur. M. Marconi, qui trouve l'interrupteur Foucault trop lent et lui préfère un interrupteur à palette, fait tourner la broche métallique située en regard de cette palette, autour de son propre axe, au moyen d'un petit moteur électrique; il évite ainsi la soudure qui tend à se produire et change de place les parties en présence. Une disposition du même genre a été indiquée en 1896 par M. d'Arsonval.

M. Marconi a étudié plusieurs variantes de l'ondulateur Righi, afin d'en rendre le transport et le réglage plus faciles; l'une d'elles est représentée par la *fig*. 9.

Fig. 9



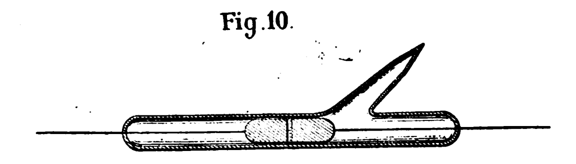
Les deux sphères ondulatrices mesurent 11 centimètres de diamètre; elles sont en laiton massif, situées à 1 millimètre environ l'une de l'autre; une feuille de papier parcheminé, fixée autour d'elles par une corde en boyau, forme un récipient étanche dans lequel on verse de l'huile de vaseline épaissie par l'addition d'un peu de vaseline.

Les boules amenant le courant sont identiques aux précédentes ou d'un diamètre un peu plus petit; chacune d'elles est portée par une tige filetée qui permet d'en modifier la distance à l'ondulateur; plus cette distance est grande, plus le potentiel sous lequel les étincelles éclatent est élevé, et, par suite, plus l'énergie mise en jeu par les premières oscillations est considérable et enfin, plus grande est la portée que peuvent franchir ces oscillations en produisant un effet déterminé.

Le cohéreur est l'organe auquel M. Marconi a fait subir la plus grande modification. Tandis qu'il suffisait à M. Lodge et aux physiciens qui effectuaient des travaux de laboratoire de posséder un appareil de sensibilité médiocre, donnant des indications à courte distance, qu'on pouvait d'ailleurs amplifier avec un galvanomètre délicat, M. Marconi a dû chercher à obtenir une variation qui fût aussi régulière que possible sous l'influence d'une excitation relativement faible, et qui fût capable de commander le mouvement d'un relais télégraphique.

Son tube (*fig.* 10) a des dimensions très réduites; il

Fig.10.



est en verre de $2^{mm},5$ de diamètre intérieur soigneusement calibré, avec deux électrodes cylindriques d'argent bien ajustées, de manière à toucher exactement les parois du tube et à s'opposer à toute fuite de limaille.

Cette poudre est un mélange de 96 parties de nickel dur et de 4 parties d'argent écroui. M. Marconi recommande pour sa préparation les soins suivants :

Limer les métaux avec une lime neuve, un peu grosse, dégraissée, lavée, puis séchée sur une flamme et employée encore chaude. Séparer par deux tamisages les parties les plus fines et les plus grosses, ne conserver que la limaille moyenne de dimensions régulières. Éviter l'oxydation et le contact des corps gras.

La quantité de limaille nécessaire à la fabrication d'un cohéreur est très petite, elle ne doit former qu'une couche d'environ 1 millimètre d'épaisseur et n'être ni comprimée, ni trop libre.

Les électrodes d'argent sont prolongées par des fils fins de platine; elles sont soigneusement polies et légèrement amalgamées avant d'être mises en place.

Le tube est scellé à la lampe. M. Marconi qui avait d'abord préconisé d'y faire le vide jusqu'à 4 millimètres ne juge plus cette opération indispensable. Un cohéreur fonctionne, en effet, aussi bien sous la pression normale que dans une atmosphère raréfiée; cependant l'absence d'air est une bonne chose, car l'oxydation de la limaille est évitée. M. Branly a montré que l'ancienneté de préparation d'une limaille a une influence sur sa conductibilité; ce fait doit être attribué à une altération superficielle.

Si la poudre d'un cohéreur est trop peu serrée, l'appareil n'est pas assez sensible; si elle est trop comprimée, il est capricieux et conserve souvent une conductibilité notable après avoir été agité. D'après M. Marconi, un bon tube doit fonctionner sous l'action

des étincelles produites par une sonnerie à trembleur située à 1 mètre de lui.

Les bobines de réactance, que M. Marconi place de part et d'autre du cohéreur, sont formées de quelques tours de fil de cuivre recouvert de soie, enroulés sur un tube de verre contenant un barreau de fer. D'après lui, ces bobines s'opposent à ce que les ondulations incidentes se partagent entre le cohéreur et le circuit du relais.

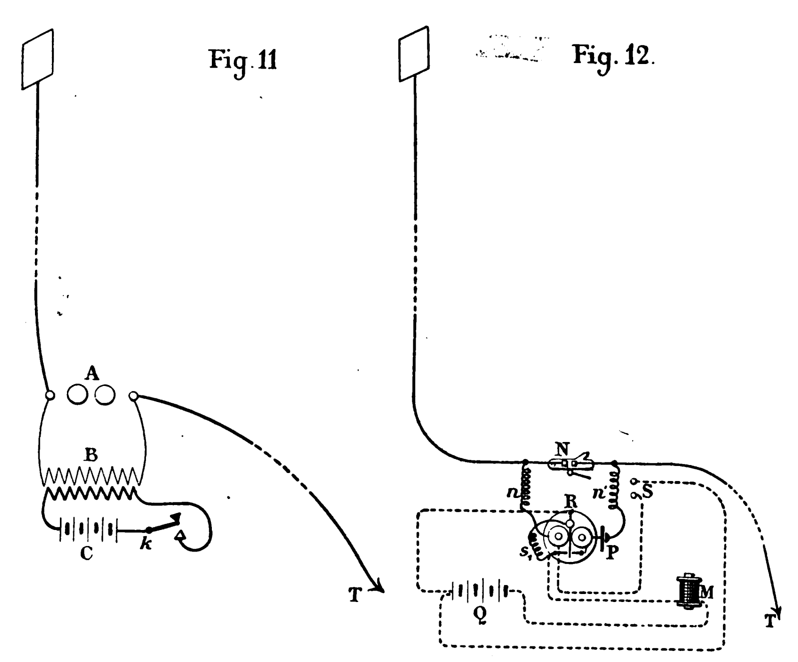
M. Marconi place des dérivations appropriées sur le relais et sur la sonnerie aux points où les étincelles d'extra-courant se produiraient. Il ignorait sans doute, lorsqu'il a rédigé ses brevets, que les condensateurs et les shunts sans self-induction sont d'un usage classique comme pare-étincelles, car il en a revendiqué l'emploi. Il est néanmoins incontestable qu'une disposition de ce genre soit presque indispensable; c'est faute d'y avoir eu recours que M. Lodge a dû renoncer à employer la sonnerie pour décohérer et que d'autres expérimentateurs ont dû enfermer cet appareil dans une boite de fer.

Un point sur lequel M. Marconi a beaucoup insisté est relatif à l'accord qu'il établissait entre le poste récepteur et le transmetteur, au moyen des ailettes. D'après lui, celles-ci doivent avoir une longueur telle que le système qu'elles forment avec le cohéreur représente un résonnateur électrique accordé avec l'ondulateur; il indique, pour les régler, le procédé qu'a décrit M. Righi pour fabriquer des résonnateurs avec une bande de glace argentée, consistant à déterminer, au voisinage de l'appareil, la longueur que doit avoir un résonnateur formé de deux bandes d'étain collées sur une plaque de verre pour déceler, à la

plus grande distance possible, les ondulations du transmetteur; la longueur de ces bandes donnerait l'amplitude des ailettes du cohéreur.

Ce procédé n'est pas applicable pour la communication à longue distance et, dans la disposition employée pour cet usage, on ne trouve plus, dans le récepteur et dans le transmetteur, d'éléments réglables sur lesquels on puisse agir pour produire une concordance.

Installation pour communiquer à longue distance. — Pour franchir de grandes distances, M. Marconi



dispose, aux stations correspondantes, une plaque métallique verticale, soigneusement isolée, à une

grande hauteur au-dessus du sol; il la relie par un fil conducteur dans l'une au transmetteur, dans l'autre au récepteur et établit, en outre, une communication de ces deux appareils avec la terre (*fig.* 11 et 12). Ces appareils peuvent être placés dans un endroit abrité, situé à une certaine distance, voire même dans une enceinte métallique, pourvu que l'isolement du conducteur raccordé à la plaque soit rigoureusement assuré.

Les supports sont constitués par des poteaux bien secs, enduits de goudron et munis d'isolants pour recevoir les plaques. Dans quelques expériences, ils ont été remplacés par des cerfs-volants dont la surface et la ficelle étaient métallisées.

(*A suivre.*)

J. VOISENAT.



TRANSMETTEUR AUTOMATIQUE A SIGNAUX BRIDES

(AUTOMATIC CURB TRANSMITTER) DE M. MUIRHEAD (*)

L'idée de remplacer le travail manuel sur les longs câbles sous-marins par la transmission automatique remonte vers l'année 1876 ; à cette époque, les célèbres savants Lord Kelvin (Sir W. Thomson) et M. Fleeming Jenkin se sont occupés spécialement de ce problème intéressant et le résultat de leurs travaux réunis fut l'ingénieux appareil appelé par eux le « Curb Sender » automatique, qui devait accélérer la transmission par l'emploi des signaux bridés (curbed signals), c'est-à-dire des signaux formés par l'émission de deux ou plusieurs courants successifs. Ce mode d'exploitation a pour effet, comme on sait, de hâter la décharge du câble et de donner à la courbe d'arrivée une inclinaison plus accentuée. Nous n'avons jamais vu le Curb Sender de Kelvin et Jenkin ; au dire du *Telegraphic Journal and Electrical Review* (notice biographique de Sir W. Thomson, p. 3, vol. V, 1877) il a été essayé sur quelques câbles de l' « Eastern Telegraph C° » ; en 1876, il a fait l'objet d'une longue communication de M. Ewing à la « Society of Telegraph Engineers » (*Journal Soc. Tel. Eng.*, vol. V, p. 213, 1876) et plus

(*) *Journal Télégraphique international de Berne*, 25 avril 1898.

tard quelques traités de télégraphie l'ont décrit avec plus ou moins de détails. Nous dirons pourtant qu'il n'est mentionné que très sommairement dans le grand ouvrage de M. Wünschendorff sur la télégraphie sous-marine qui certainement est le recueil le plus complet sur cette matière. M. Thomas (*Télégraphie*, Paris 1894) lui a réservé une place tout en faisant remarquer qu'il n'est plus employé aujourd'hui, « l'introduction de condensateurs aux deux extrémités d'un câble produisant par un procédé beaucoup plus simple un résultat comparable ». On nous a affirmé du reste qu'un défaut sérieux de l'appareil constituait le fait qu'il fallait arrêter le mouvement si l'on voulait changer la durée du « curb », cette opération nécessitait même l'emploi d'un tournevis. MM. Kelvin et Varley avaient déjà proposé en 1865 une clef *manuelle* (curb key) permettant l'emploi de signaux bridés (brevet anglais N° 1 784, 1865); d'après le mémoire bien connu de M. Willoughby Smith (On the working of long submarine cables, *Journal Soc. Tel. Eng.*, vol. VIII, 1879) elle n'a jamais donné des résultats satisfaisants. En 1879, MM. Siemens et Halske ont imaginé une clef semblable mais beaucoup plus perfectionnée; on a pu la voir à l'exposition d'électricité de Paris (1881), sans qu'une description détaillée en ait été publiée (voir une note de M. Zetzsche dans le *Bericht über die wissenschaftlichen Instrumente der Berliner Gewerbe-Ausstellung* 1879).

Ainsi la question, ou plutôt le problème de la transmission par signaux bridés *et même de la transmission automatique pure et simple* sur les câbles d'une certaine longueur semblait presque abandonnée, les ap-

pareils existants n'ayant évidemment pas fourni des résultats satisfaisants.

Au mois de septembre 1882 et au mois de janvier 1883, M. Brahic, alors commis principal du poste central de Marseille, imagina une modification du transmetteur et du perforateur Wheatstone pour appliquer la transmission automatique au siphon recorder. Cet appareil, véritable réduction de la clef double en usage sur les câbles, donna de bons résultats, mais la trop grande légèreté des pièces mobiles et divers autres circonstances firent préférer un autre système étudié par M. l'Inspecteur général Belz avec le concours de M. Brahic. Lors de notre visite au poste central de Marseille, en 1886, nous avons vu marcher admirablement cet arrangement; nous en avons donné une description détaillée dans le volume XXII de la *Lumière électrique*, p. 243; en 1888, M. Belz lui-même en a parlé dans les *Annales télégraphiques* (vol. XV, p. 193). Il est également décrit dans les traités de MM. Wünschendorff et Thomas. Le principe du système Belz et Brahic consiste à employer comme manipulateur sur le câble un double relais Froment monté en inverseur de courant et à n'utiliser le transmetteur Wheatstone modifié que pour actionner au moyen d'une pile locale les électro-aimants de ce relais.

Une solution semblable du problème est constituée par le transmetteur automatique de M. J. Timm, électricien de la « Great Northern Tel. C° ». (*Electr. Review* vol. XXVI, p 157, 1890); d'après la source citée, l'appareil donne de bons résultats sur les câbles de Hongkong à Shanghaï. Dans la même année, M. T. J. Wilmot, surintendant de la « Commercial Cable Company » à Waterville a fait breveter un transmetteur auto-

matique très simple (brevet anglais N° 14 077, 1890).

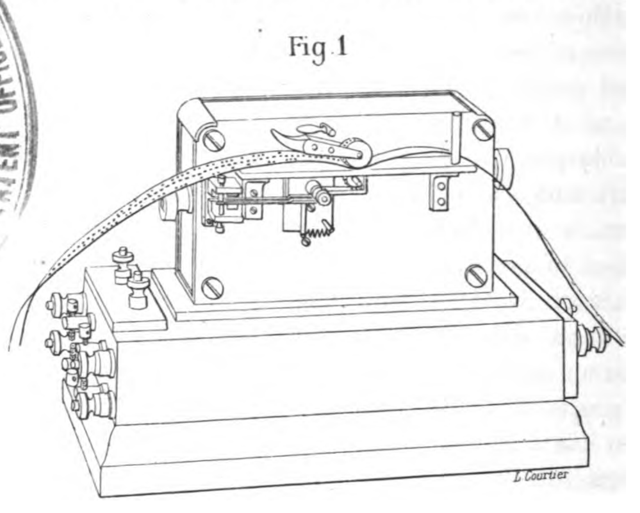
Les appareils dont nous parlions tout à l'heure sont des transmetteurs automatiques purs et simples, c'est-à-dire qu'ils ne possèdent pas de dispositif pour envoyer des signaux bridés, à l'exception toutefois du curb-sender de Kelvin et Jenkin. M. le Dr A. Muirhead nous a montré dans son laboratoire, en 1893, un appareil complet qu'il fit breveter dans la même année (brevet N° 19183, 1893), qui constituait déjà un notable progrès, un grand pas en avant dans la bonne direction. Quoique cet arrangement ait été supplanté par le transmetteur que nous décrivons plus loin, nous en dirons quelques mots. Comme dans le système Belz et Brahic le transmetteur proprement dit n'envoie pas directement le courant dans le câble, il agit sur un relais spécial qui commande les émissions des signaux et des contre-courants, dispositif dont l'idée est due à M. Saunders, électricien en chef de l' « Eastern Tel. C° ».

Le transmetteur est d'une extrême simplicité, le balancier, les aiguilles du Wheatstone ont disparu et se trouvent remplacés par deux leviers coudés munis à l'une de leurs extrémités de crochets arrondis qui entrent dans les perforations latérales de la bande de papier, à l'autre extrémité par un ressort de contact (*fig.* 1). Ce ressort s'appuie normalement sur une vis de contact, tant qu'il n'y a pas de trou dans la bande. Dès qu'un trou se présente, dans la rangée antérieure ou postérieure, le crochet du levier correspondant entre dans le trou, l'autre extrémité munie d'un long ressort s'abaisse, quitte le contact de repos et se porte sur le contact de travail.

Le relais se compose (*fig.* 2) de deux électro-aimants

T entre les pôles desquels deux armatures polarisées se meuvent ; on voit immédiatement que ces deux armatures avec leurs contacts de repos et de travail constituent une clef d'inversion. Les électros réunis en série sont shuntés par une bobine P′ à forte self-

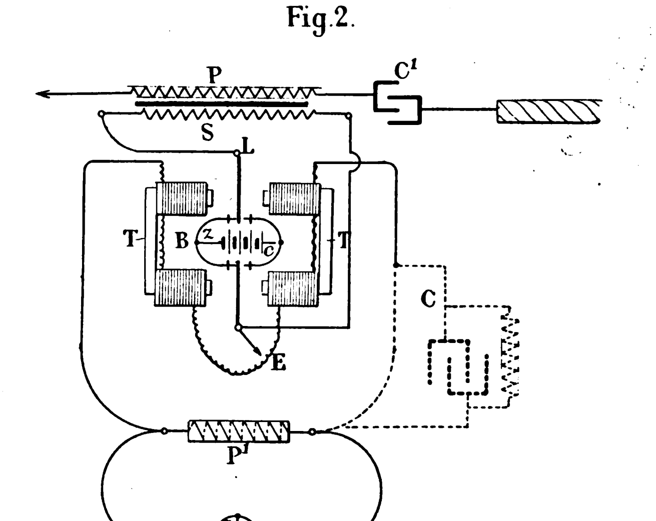
Fig 1



induction (genre des électros Godfroy, voir *Journal télégraphique*, vol. XIV, p. 246, 1890 ; la marge de réglage est cependant beaucoup plus considérable). Le transmetteur n'est représenté dans la figure que par ses deux leviers de contact S_1 et S_2, B′ est la pile locale qui actionne le double relais, B la pile de transmission. L'armature supérieure L est reliée par une espèce de transformateur P S au condensateur C′ placé à la tête du câble, l'armature E inférieure à la terre. Admettons que le levier S′ se mette sur le contact de travail, l'armature L se portera vers la droite et émettra un courant positif dans P S, C′ et le câble. L'armature E qui ne répond qu'aux courants négatifs, restera au

repos. Au moment où S′ se relève, sa languette se trouvera un instant entre les deux contacts, par conséquent l'extra-courant de rupture de P′ traversera les électros du relais en sens opposé, L sera remise au repos et E sera projetée momentanément vers la droite et enverra un court courant de sens opposé dans S P, donc le premier signal sera « bridé ». Dans

Fig.2.

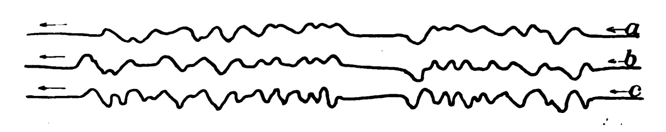


certains cas on a trouvé très avantageux d'intercaler un condensateur shunté C″ entre P′ et l'entrée du relais pour pouvoir régler facilement l'intensité de l'extra-courant de P′.

Le double relais polarisé Muirhead-Saunders convient admirablement pour produire des signaux bridés au moyen d'une clef manuelle. On relie les deux lames de la clef à l'entrée de P′ (*fig.* 2), les pôles C et Z de

deux piles locales (de 7 — 8 éléments Leclanché chacune) aux deux contacts de travail et, de la jonction des piles, on mène un fil à la sortie de P′. Le transformateur S P et le condensateur shunté C″ peuvent être supprimés. Nous avons expérimenté ce dispositif sur notre ligne artificielle (R = 6000 ω, C = 200 mfds) en employant comme récepteur des signaux le recorder de M. Carpentier (*Elektrotechnische Zeitschrift*, vol. IX, p. 393, 1888), la pile de transmission se composait de 10 éléments Leclanché. La *fig*. 3 *a b c* montre les mots « Paris » et « Bern », *a* sans « curb », *b* curb normal, *c* curb exagéré. Ces derniers signaux s'obtenaient

Fig. 3.



lorsque les noyaux de P′ étaient enfoncés jusqu'au bout dans les bobines. Le réglage de l'appareil est des plus simples. Mentionnons encore que l'arrangement à deux piles locales actionnant le relais est préférable à celui de la *fig*. 2, le « développement » de l'extra-courant étant plus long par l'absence de contacts de repos dans la clef.

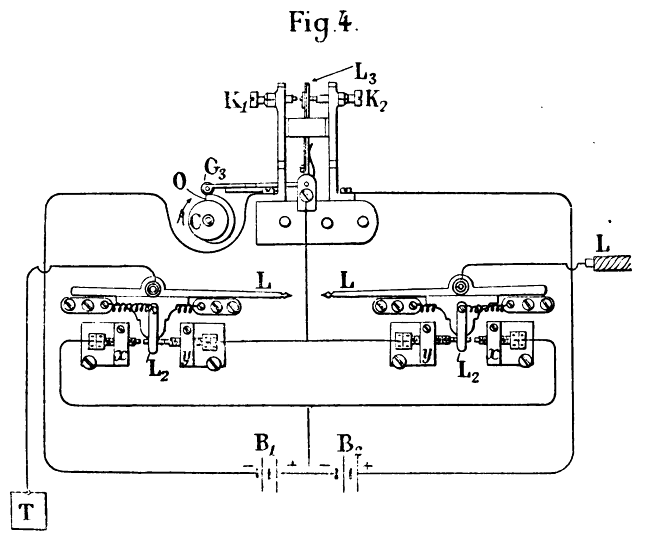
En 1894, M. Muirhead a complètement refait son transmetteur (voir les brevets N°s 5508 et 11069). Nous allons décrire maintenant le modèle le plus récent en nous basant en partie sur une brochure publiée à Londres à l'usage des employés de l' « Eastern Tel. C°». Nous avons dû refaire cependant certains paragraphes du texte qui manquaient absolument de clarté. Une

courte notice, accompagnée de quelques figures, se trouve dans le volume XVIII (p. 320) de l'*Elektrotechn. Zeitschrift* et dans une lecture de MM. Sayers et Grant, reproduite par l'*Electrical Review* (vol. XLI, p. 110, 1897).

Vers la fin de 1894, MM. H. A. Taylor et A. Dearlove ont pris un brevet pour un transmetteur à signaux bridés (brevet N° 20 807, 1894) dont on trouve la description détaillée dans le grand traité de télégraphie sous-marine de M. C. Bright, qui vient de paraître.

Le principe sur lequel est basé le transmetteur Muirhead ressort clairement de la *fig.* 4. Nous avons

Fig. 4.

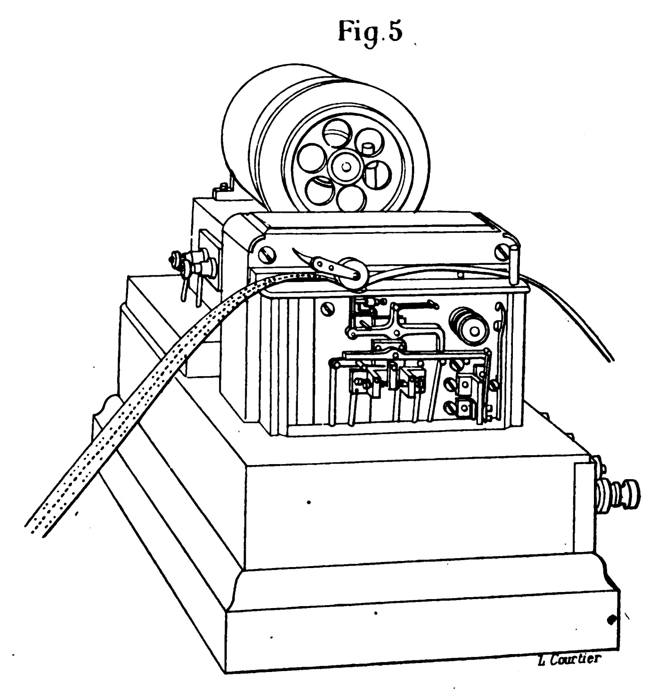


deux leviers de contact L_2 qui remplissent les mêmes fonctions que les lames d'une clef d'inversion employée sur des câbles desservis par le recorder ou le miroir. En réalité ils sont superposés (*fig.* 5), pour plus de clarté on les a séparés et placés côte à côte dans la

fig. 4. Un troisième levier L_3 détermine le sens du courant envoyé dans le câble et produit le contre-courant, le « curb » signal.

La dépêche se prépare, comme dans tous les appareils automatiques, au moyen du perforateur bien

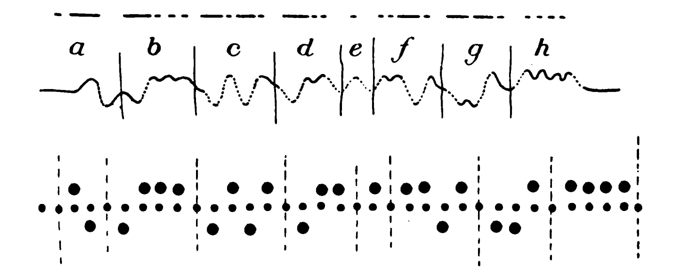
Fig.5



connu, lequel, dans notre cas, a pu être beaucoup simplifié, puisqu'il n'a à transmettre que des points. Il n'y reste plus que trois poinçons, l'un pour l'émission de courants négatifs correspondant aux points, l'autre pour celle des courants positifs correspondant aux traits de l'alphabet Morse, le troisième enfin pour l'entraînement de la bande de papier. La *fig*. 6 montre une bande perforée et une bande de signaux corres-

pondants du recorder, on voit de suite que les trous de la rangée inférieure (ou antérieure en réalité) correspondent aux *traits*, ceux de la rangée supérieure (ou postérieure en réalité) aux *points*. L'intervalle entre deux lettres est formé par *un* trou, et l'intervalle entre deux mots par *trois* trous de la rangée du milieu. Dans le transmetteur il y a deux aiguilles, chacune juste au-dessous des deux rangées extrêmes de la bande; l'action de ces aiguilles sur les leviers de contact L_2 va être expliquée plus loin. Supposons que, le mouvement étant en marche, l'une des aiguilles rencontre

Fig.6



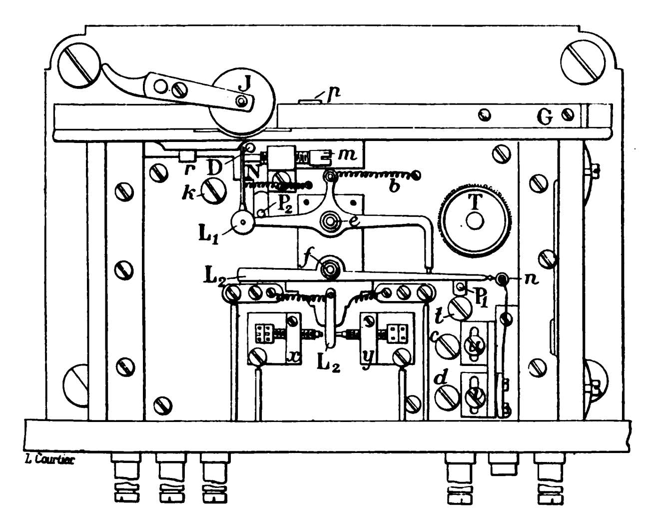
un trou de la rangée supérieure de la bande, le levier L_2 de gauche basculera, il va quitter le contact y et toucher x. Au même moment, le galet G_3 du levier L_3 (*fig.* 4) tombe dans l'encoche O de la came C et L_3 entre en communication avec K_1. La pile B_1 a son pôle *négatif* relié à G_3, la pile B_2 son pôle *positif* à K_2. Marche du courant : Pôle Z de la pile B_1, K_1, L_3 contact y du levier L_2 de droite, L_2, câble de retour par la terre, levier L_2 de gauche, x, pôle K de B_1. Pendant la rotation de la came C, G_3 vient d'être soulevé, L_3 quitte K_1

et se porte sur K_2, ce qui donne lieu à l'émission du contre-courant, savoir : Pile B_2, pôle K, K_2, L_3, y, câble terre, x, pôle Z de B_2. L'effet de cette double émission d'un courant négatif suivi immédiatement d'un courant positif produira sur la bande du récepteur (recorder) le signal correspondant à un point, à la lettre « *e* » de la figure 6. Le déplacement de l'aiguille correspondant aux perforations de la rangée inférieure de la bande commande les mêmes manœuvres, seulement c'est alors le levier L_2 de droite qui entre en action, le courant donnant le signal partant du pôle K de B_1, le contre-courant du pôle Z de B_2. Nous obtenons donc une ondulation correspondant à un trait. On voit que le signal et le curb terminés, le câble se trouve à la terre, L_2 ayant repris sa position de repos. Examinons maintenant la liaison des aiguilles avec l'assemblage des leviers L_2 et L_3.

J (*fig.* 7) est le rouleau destiné à guider la bande perforée. N est l'aiguille antérieure rencontrant les trous de la rangée inférieure, elle est reliée au levier à deux bras L_1 agissant sur le levier de contact L_2. Le « balancier » bien connu des appareils Wheatstone se trouve remplacé ici par deux goupilles P_1 et P_2 mises en oscillation par des cames tournantes montées sur le même axe. Ces goupilles sortent par des fentes ménagées dans la platine de l'appareil. Lorsque l'aiguille N rencontre un trou de la bande, elle monte; puisque au même moment la goupille P_2 exécute un mouvement ascendant, le levier L_1 bascule, la goupille P_1 s'écarte (descend), donc L_2 obéit à la pression de L_1, quitte le contact y et touche x, sa nouvelle position se trouvant assurée par l'action du petit rouleau de friction n. Le signal étant terminé, P_2 s'abaisse,

presse sur L_1, l'aiguille N se trouve retirée, P_1 monte et remet le levier de contact L_2 dans la position de repos. L'axe des cames faisant fonctionner les goupilles P_1 et P_2 agit en même temps au moyen d'une troisième came (C *fig.* 4) sur le levier L_3, lequel détermine, comme on a vu plus haut, le signal et le « curb ». Faisons remarquer que le mouvement ascen-

Fig. 7.

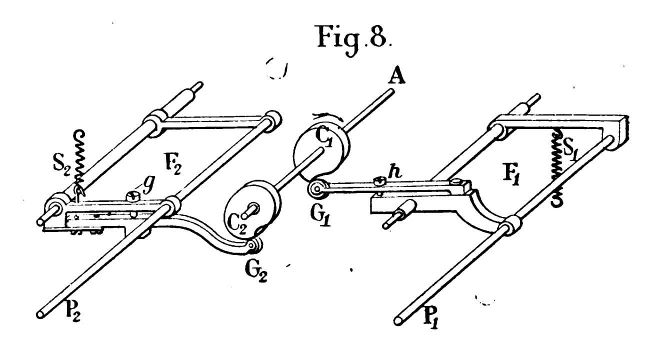


dant de P_1 permet aux *deux* leviers L_1 (placés l'un derrière l'autre) de basculer, mais il n'y a que celui dont l'aiguille rencontre un trou de la bande qui peut exécuter ce mouvement, donc, dans le cas que nous avons examiné, les leviers postérieurs que nous désignons par L'_1 et L'_2 ne bougeront pas. Le passage de l'aiguille postérieure N′ dans un trou de la rangée supérieure provoquera donc le déplacement des leviers L'_1 et L'_2.

Les *fig.* 8 et 9 font voir les détails de l'axe des cames.

La came C_2 est ajustée de façon qu'au moment où une dent de la roue d'entraînement de la bande entre dans un trou de la rangée du milieu, le galet G_2 tombe dans l'encoche de C_2, donc sous l'effort du ressort S_2 le levier de G_2 et par conséquent la tige ou goupille P_2 monte et rend libre le levier L_1 (*fig.* 7). Pendant la rotation de l'axe A, G_2 commence à être soulevé, ce qui produit l'abaissement de P_2 et fait que l'aiguille

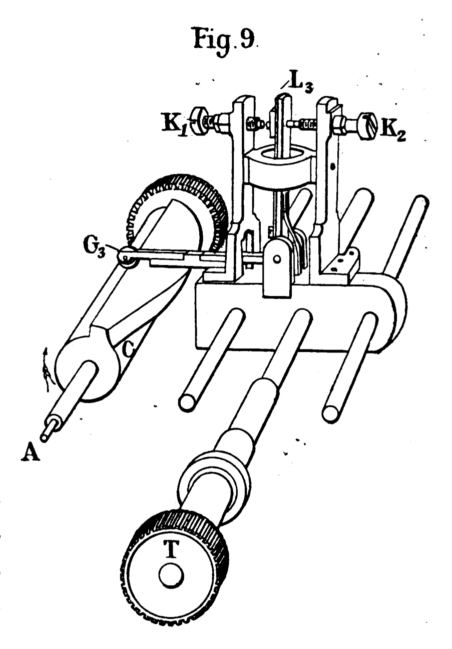
Fig. 8.



N se trouve retirée du trou. Le mouvement de la goupille P_1 s'obtient de la même façon; G_1 tombe dans l'encoche de C_1, P_1 s'abaisse et permet le déplacement du levier-clef L_2 et le replace finalement, le signal et le « curb » terminés. Dans le Wheatstone ordinaire, si on met l'appareil en marche sans insérer une bande perforée, celui-ci émet une succession de courants alternatifs sur la ligne; dans curb-sender Muirhead, au contraire aucun effet électrique ne se produit dans ce cas, voici pourquoi. Les aiguilles N sont évidemment libres de monter et pénétrer dans les fentes ou rainures latérales du disque d'entraînement J (*fig.* 7),

par conséquent les deux leviers L_1 agissent simultanément sur les clefs de contact L_2, lesquelles touchant en même temps leurs vis de contact x mettent la ligne à la terre, comme à l'état de repos des leviers L_2.

Il nous reste à dire un mot du levier de contact L_3 et de la came C. La *fig.* 9 montre ce dispositif. On voit que la came C a une forme oblique particulière, elle est ajustée de façon (comme du reste C_1 et C_2) que le petit galet G_3 adapté au bras horizontal de L_3 quitte l'arête O de C (voir *fig.* 4) juste au moment où une dent de la roue D (*fig.* 7) entre dans un trou de la rangée du milieu de la bande. L'inspection de la *fig.* 9 fait voir tout de suite que la durée relative des courants produisant le signal et le « curb » dépend de la position du bras G_3 sur la surface de la came C ; pour pouvoir régler la durée des contacts entre L_3, K_1 et K_2 à volonté, la plate-forme en ébonite, qui porte le levier L_3 et ses pièces de contact, se déplace facilement dans une direction parallèle à l'axe A des cames. On n'a qu'à agir sur le bouton moleté T. Pour donner

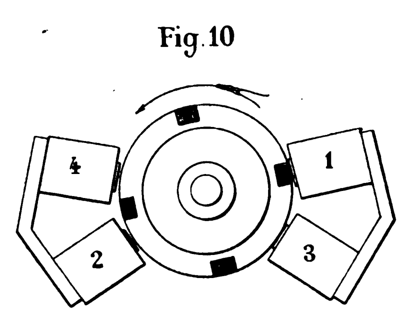


plus de rigidité aux piliers de vis K_1, K_2, on les a réunis par un anneau-traverse en ébonite, dans l'intérieur duquel L_3 oscille librement. L'ingénieuse disposition que nous venons de décrire permet donc de régler la durée des émissions de courants pendant la marche de l'appareil.

Si l'on veut se servir de l'appareil comme transmetteur automatique ordinaire, c'est-à-dire supprimer le « curb », on n'a qu'à enlever la pile B_2 et à relier la vis de contact K_2 aux contacts x, ce qui se fait en joignant directement les deux bornes où s'attachent les fils de la pile B_2 (*fig.* 4).

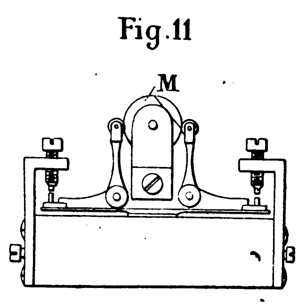
Le rouage du transmetteur est mis en mouvement par un moteur électrique dans le genre du « mouse mill » du recorder de Lord Kelvin; toutefois nous avons ici quatre électro-aimants au lieu d'un seul. Dans la position de la *fig.* 10 le courant a justement cessé d'actionner l'électro 1, ce sera l'électro 2 qui va attirer une des quatre armatures du tambour; plus tard c'est le numéro 3 qui va être activé et ainsi de suite. Il y a quatre commutateurs (*fig.* 11), dont les cames M sont arrangées de façon que le courant ne passe que par une seule paire de bobines à la fois. La série des cames est montée sur un axe engrenant dans celui du tambour (*fig.* 10), elle fait quatre tours pour un tour du moteur. L'arbre de couche tourne dans des coussinets sphériques afin

Fig. 10



de diminuer autant que possible la friction. A la droite de la caisse contenant le moteur se trouve le régulateur, une manette glissant sur des pièces de contacts reliées à des résistances; au moyen de ce dispositif, on peut faire varier la vitesse de 50 p. 100. On peut du reste changer le rapport par des moyens mécaniques en insérant des roues de différents diamètres dans l'intérieur des platines de l'appareil. Le moteur que nous venons de décrire sommairement donne d'excellents résultats lorsqu'il est alimenté par une pile de quatre éléments Kelvin (tray battery); ces éléments, de très grandes dimensions, ont une force électro-motrice très constante et une faible résistance intérieure. Naturellement il y a avantage à les remplacer par des accumulateurs s'il se trouve une source d'électricité pour la charge. Ceux de nos lecteurs, qui s'intéressent à l'histoire de la science d'électricité, auront remarqué que le moteur Muirhead n'est en somme qu'un moteur Froment perfectionné; cet éminent mécanicien avait déjà reconnu en 1845 (*) l'avantage de l'action directe des électros sur l'axe du moteur, tandis que d'autres constructeurs imitaient les manivelle et bielle de la machine à vapeur sans penser que cet artifice inutile « mangeait » une grande partie du travail développé, en lui-même forcément faible. Il paraît que les moteurs électriques jouissent d'une

Fig.11



(*) *La Lumière électrique*; vol. IX, 1883, p. 194.

grande faveur de la part des constructeurs d'appareils de télégraphie sous-marine. Ces moteurs ne nécessitent pas le remontage si ennuyeux des mouvements d'horlogerie; d'après MM. Sayers et Grant (*loc. cit.*), ces derniers conviennent mal pour les pays chauds à cause de la dessiccation rapide de l'huile.

Sans vouloir insister en détail sur le réglage du transmetteur Muirhead, nous allons dire encore un mot sur le mode de déterminer la durée relative du contact avec la pile de travail et celle du « curb ». En tournant le bouton moleté T (*fig.* 9) vers la droite (dans le sens de la marche des aiguilles d'une montre), la plate-forme en ébonite, qui porte les butoirs de contact K_1 K_2 et le levier coudé L_3, avance « vers l'observateur », par conséquent le galet G_3 après sa chute dans l'encoche de C (voir *fig.* 4) y restera pendant un temps relativement long avant d'être soulevé, puisque c'est la portion la plus étroite de la surface C qui va agir sur lui.

En tournant T dans le sens opposé, on augmente la surface de C, donc G_3 sera relevé plus tôt. En d'autres termes, dans le premier cas, on augmente la durée du contact de L_3 avec K_1, par conséquent la durée de l'émission du courant produisant le signal, et on diminue l'action du contre-courant ou « curb ». Dans le second cas c'est l'inverse. Ces manœuvres s'exécutent, bien entendu, avec la plus grande facilité, l'appareil étant en pleine marche; c'est là un perfectionnement qu'aucun des appareils antérieurs ne possédait, et qui explique le succès commercial du transmetteur Muirhead. L'employé surveillant la transmission peut donc à chaque instant, en obéis-

Fig.12.

1
a *b* *c* *d*
2
3
4
5
6
7
8
9
10
a *b* *c* *d* *a* *b* *c* *d*
11
12
13

sant aux ordres de son correspondant, modifier la forme des signaux. Dans la *fig.* 4, les piles B_1 et B_2 sont supposées contenir le même nombre d'éléments, ce qui se fait dans la plupart des cas ; dans certaines circonstances il peut être avantageux de rendre la pile B_2 plus faible.

La *fig.* 12 montre une série de signaux obtenus sous différentes conditions par M. Muirhead sur une grande longueur de son câble artificiel ($R = 8060\ \omega$, $C = 886$ mfd.).

N^{os}				
1.	Sans condensateurs,		transmission auto,	sans curb.
2.	Condens. de réception = 60 mfd. . . .		—	—
3.	Condens. de réception / — transmiss.	60 mfd.	—	—
4.	— *id.*	60 mfd.	—	avec curb.
5.	Condens. de réception.	60 mfd.	—	—
6.	Sans condensateurs.		—	—
7.	Condens. de réception.	60 mfd.	—	—
	— transmiss.	120 mfd.	—	—
8.	— *id.*		—	curb trop fort.
9.	— *id.*		—	— faible.

Les n°s 10 à 13 enfin (curb supprimé) font voir l'effet de la durée du contact avec la pile (B_1 *fig.* 4).

N°s 10. Court contact.
11. Contacts « pile » et « terre » égaux.
12. — — prolongé.
13. — — augmenté graduellement.

Il paraît que la constante de temps « speed constant », ainsi qu'on désigne le produit $CR \times$ nombre de lettres par minute, a été augmentée de 50 p. 100

par l'emploi du transmetteur Muirhead, qui actuellement fonctionne sur tous les longs câbles de l'Eastern Tel C°, de l'Eastern Extension et de la « Brazilian Submarine Tel C° ».

Dr A. TOBLER,
Professeur à l'École polytechnique de Zurich.

SUR UNE CLASSE PARTICULIÈRE

DE

SURFACES ÉQUIPOTENTIELLES CYLINDRIQUES

Les courbes que je me propose d'examiner ici sont une généralisation des familles d'ellipses et d'hyperboles homofocales.

Je rappellerai tout d'abord que les familles d'ellipses et d'hyperboles homofocales peuvent être étudiées sur l'équation complexe très simple :

$$(1) \qquad x + y\sqrt{-1} = c \sin\left(p + q\sqrt{-1}\right).$$

Si le paramètre q varie, p restant constant, l'affixe (x, y) décrit l'hyperbole dont l'équation réelle est :

$$\frac{x^2}{c^2 \sin^2 p} - \frac{y^2}{c^2 \cos^2 p} = 1.$$

Si de même le paramètre p varie, q restant constant, l'affixe (x, y) décrit l'ellipse dont l'équation réelle est :

$$\frac{x^2}{c^2 \dfrac{e^{2q} + e^{-2q} + 2}{4}} + \frac{y^2}{c^2 \dfrac{e^{2q} + e^{-2q} - 2}{4}} = 1.$$

On voit aussitôt que ces deux équations définissent des fonctions p et q de x et de y qui, en vertu de l'équation (1), satisfont à l'équation :

$$(2) \qquad \frac{d^2V}{dx^2} + \frac{d^2V}{dy^2} = 0,$$

et que les deux familles de courbes sont orthogonales.

Si de même j'envisage l'équation :

$$(3)\qquad x + y\sqrt{-1} = sn\,(P + Q\sqrt{-1}),$$

l'affixe x, y décrira une courbe, lorsque le paramètre P variera, Q restant constant; l'équation de cette courbe, en posant $sn\,Q\sqrt{-1} = a\sqrt{-1}$, est de la forme algébrique ci-après :

$$(4)\quad (x^2+y^2)^2 - \left(\frac{1+a^2}{1+k^2a^2} + \frac{1}{k^2}\frac{1+k^2a^2}{1+a^2}\right)x^2 - \left(a^2 + \frac{1}{k^2a^2}\right)y^2 + \frac{1}{k^2} = 0.$$

Si je considère maintenant le paramètre P comme constant et que Q varie, l'affixe x, y décrira une autre courbe dont l'équation, en posant $sn\,P = t$, peut s'écrire :

$$(5)\quad (x^2+y^2)^2 + \left(\frac{1-t^2}{1-k^2t^2} + \frac{1}{k^2}\frac{1-k^2t^2}{1+t^2}\right)y^2 - \left(t^2 + \frac{1}{k^2t^2}\right)x^2 + \frac{1}{k^2} = 0.$$

Ces deux dernières équations peuvent d'ailleurs être considérées comme définissant deux fonctions P et Q de x et de y, et ces fonctions P et Q, en vertu de l'équation (3), satisfont à l'équation (2). Les deux familles de courbes obtenues sont d'ailleurs orthogonales. Nous avons déjà donné ces résultats et construit les courbes dans un article paru sous le même titre dans le numéro de septembre-octobre 1894, de ce même recueil, page 460. Ce qui nous engage cependant à revenir sur la question, c'est que nous sommes parvenus à transformer les équations (4) et (5), de manière à en faire ressortir une définition géométrique très simple pour les courbes obtenues. Ce résultat est évidemment de nature à faire gagner

beaucoup en intérêt les considérations précédentes.

Examinons, par exemple, l'équation (5); elle est de de la forme :

$$(x^2+y^2)^2+py^2-qx^2+\frac{1}{k^2}=0,$$

et si je pose :

$$\alpha=\frac{1}{2}\sqrt{p+q},$$

$$\frac{1}{4}H^2=\frac{p^2}{4}-\frac{1}{k^2},$$

$$R^2=\frac{1}{4}(p-q),$$

elle pourra se mettre sous la forme :

$$[(x-\alpha)^2+y^2-R^2]\,[(x+\alpha)^2+y^2-R^2]=\frac{H^2}{4}.$$

D'où résulte cette définition :

Si T et T′ sont les puissances d'un point (x, y) par rapport à deux cercles de rayon R dont les centres sont situés sur l'axe des x à des distances $+\alpha$ et $-\alpha$ de l'origine, l'équation de la courbe (5) peut s'écrire :

$$T\cdot T'=\frac{H^2}{4}.$$

C'est la définition géométrique que nous avons en vue.

Les valeurs de α, $\frac{H^2}{4}$ et R^2 sont d'ailleurs les suivantes :

$$\alpha=\frac{1}{2}\,\frac{1-k^2t^4}{kt}\quad\frac{1}{\sqrt{(1-t^2)(1-k^2t^2)}},$$

$$\frac{1}{4}H^2=\frac{1}{4}\left(\frac{1-k^2}{1-k^2t^2}-\frac{1}{k^2}\,\frac{1-k^2t^2}{1-t^2}\right)^2,$$

$$R^2=\frac{1}{4}\,\frac{(1+k^2t^4-2t^2)(1+k^2t^4-2k^2t^2)}{k^2t^2(1-t^2)(1-k^2t^2)}$$

Les calculs à faire par cette voie sont assez pénibles ; ils supposent que l'on connaît déjà l'équation de la courbe mise sous forme entière et ordonnée. On peut arriver plus rapidement au résultat par la méthode ci-après qui est plus directe.

Nous partirons de l'équation :

$$x + y\sqrt{-1} = sn\,(\mathrm{P} + \mathrm{Q}\sqrt{-1}),$$

qui nous donne les deux relations :

$$sn\,(\mathrm{P} + \mathrm{Q}\sqrt{-1}) - sn\,(\mathrm{P} - \mathrm{Q}\sqrt{-1}) = 2\,y\sqrt{-1},$$
$$sn\,(\mathrm{P} + \mathrm{Q}\sqrt{-1}) \quad sn\,(\mathrm{P} - \mathrm{Q}\sqrt{-1}) = x^2 + y^2 = \rho^2.$$

Nous abrégerons beaucoup l'écriture en mettant $s_1 c_1 d_1$ pour $sn\mathrm{P}$, $cn\mathrm{P}$, $dn\mathrm{P}$ respectivement et $s_2 c_2 d_2$ pour $sn\mathrm{Q}\sqrt{-1}$, $cn\mathrm{Q}\sqrt{-1}$, $dn\mathrm{Q}\sqrt{-1}$ respectivement.

Alors deux formules connues de la théorie des fonctions elliptiques donnent :

$$y\sqrt{-1} = \frac{c_1 d_1 s_2}{1 - k^2 s_1^2 s_2^2},$$
$$\rho^2 = \frac{s_1^2 - s_2^2}{1 - k^2 s_1^2 s_2^2}.$$

Ces équations, mises sous forme entière, sont du second degré en s_2 ; et l'élimination de s_2 entre elles donne, en supprimant les indices 1 devenus désormais inutiles :

$$\left[y\sqrt{-1}\,(1 - k^2 s^2 \rho^2) + k^2 s^2 y\sqrt{-1}\,(\rho^2 - s^2)\right]^2 + c^2 d^2 (\rho^2 - s^2)\,(1 - k^2 s^2 \rho^2) = 0.$$

En supprimant les termes qui se détruisent et remplaçant y^2 par $\rho^2 - x^2$, il vient en ordonnant :

$$\rho^4 + \left[\frac{(1 - k^2 s^4)^2}{k^2 s^2 c^2 d^2} - s^2 - \frac{1}{k^2 s^2}\right]\rho^2 - \frac{1 - k^2 s^4}{k^2 s^2 c^2 d^2}\cdot x^2 + \frac{1}{k^2} = 0.$$

Le second terme se simplifie, en vertu de l'identité facile à vérifier :

$$\frac{(1-k^2s^4)^2}{k^2s^2c^2d^2} = \frac{1-s^2}{1-k^2s^2} + s^2 + \frac{1}{k^2}\left(\frac{1-k^2s^2}{1-s^2} + \frac{1}{s^2}\right).$$

En tenant compte des relations :

$$c^2 = 1 - s^2, \qquad d^2 = 1 - k^2s^2,$$

on a pour l'équation en ρ et x :

$$\rho^4 + \left(\frac{c^2}{d^2} + \frac{1}{k^2}\frac{d^2}{c^2}\right)\rho^2 - \frac{(1-k^2s^4)^2}{k^2s^2c^2d^2}x^2 + \frac{1}{k^2} = 0.$$

Cette équation qui est de la forme :

$$\rho^4 + m\rho^2 - n^2x^2 + \frac{1}{k^2} = 0,$$

pourra se mettre sous la forme :

$$[(x-\alpha)^2 + y^2 - \mathrm{R}^2]\,[(x+\alpha)^2 + y^2 - \mathrm{R}^2] = \frac{\mathrm{H}^2}{4},$$

si l'on pose :

$$\alpha = \frac{n}{2}, \qquad \mathrm{R}^2 = \frac{n^2 - 2m}{4}, \qquad \mathrm{H} = m^2 - \frac{4}{k^2}.$$

Or, d'après une formule connue, on a :

$$sn\, 2\mathrm{P} = \frac{2scd}{1-k^2s^4},$$

d'où :

$$\alpha = \frac{1}{k\, sn\, 2\mathrm{P}}.$$

On a aussi :

$$4\mathrm{R}^2 = \frac{(1-k^2s^4)^2}{k^2s^2c^2d^2} - 2\left[\frac{(1-k^2s^4)^2}{k^2s^2c^2d^2} - s^2 - \frac{1}{k^2s^2}\right]$$
$$= \frac{(1-2s^2+k^2s^4)(1-2k^2s^2+k^2s^4)}{k^2s^2c^2d^2}.$$

Or, d'après des formules connues, on a :

$$cn\,2\,\mathrm{P} = \frac{1 - 2\,s^2 + k^2 s^4}{1 - k^2 s^4},$$
$$dn\,2\,\mathrm{P} = \frac{1 - 2\,k^2 s^2 + k^2 s^4}{1 - k^2 s^4};$$

d'où :

$$\mathrm{R}^2 = \frac{cn\,2\,\mathrm{P} \cdot dn\,2\,\mathrm{P}}{k^2 sn^2\,2\,\mathrm{P}}.$$

Enfin, nous avons :

$$\mathrm{H}^2 = m^2 - \frac{4}{k^2} = \left(\frac{1 - s^2}{1 - k^2 s^2} + \frac{1}{k^2}\,\frac{1 - k^2 s^2}{1 - s^2}\right)^2 - \frac{4}{k^2}$$
$$= \left(\frac{1 - s^2}{1 - k^2 s^2} - \frac{1}{k^2}\,\frac{1 - k^2 s^2}{1 - s^2}\right)^2.$$

C'est ce que l'on peut écrire :

$$\mathrm{H}^2 = \left[\frac{k'^2(1 - k^2 s^4)}{k^2 c^2 d^2}\right]^2 = \frac{k'^2 s^2}{c^2 d^2} \cdot \frac{(1 - k^2 s^2)^2}{4\,s^2 c^2 d^2} \cdot \frac{4\,k'^2}{k^2}.$$

Or, on a, d'après une formule connue :

$$\frac{k'^2 s^2}{c^2 d^2} = \frac{dn\,2\,\mathrm{P} - cn\,2\,\mathrm{P}}{dn\,2\,\mathrm{P} + cn\,2\,\mathrm{P}},$$

d'où :

$$\frac{\mathrm{H}^2}{4} = \frac{k'^2}{k^4} \cdot \frac{1}{sn^2\,2\,\mathrm{P}} \cdot \frac{dn\,2\,\mathrm{P} - cn\,2\,\mathrm{P}}{dn\,2\,\mathrm{P} + cn\,2\,\mathrm{P}}.$$

L'équation (5) peut donc se mettre sous la forme suivante, où l'on a mis s', c', d' respectivement pour $sn 2\mathrm{P}$, $cn 2\mathrm{P}$, $dn 2\mathrm{P}$ et $\frac{x}{a}$, $\frac{y}{a}$ au lieu de x, y, afin de rétablir l'homogénéité :

$$(6) \quad \left[\left(x - \frac{a}{ks'}\right)^2 + y^2 - \frac{a^2 \cdot c'd'}{k^2 s'^2}\right]\left[\left(x + \frac{a}{ks'}\right)^2 + y^2 - \frac{a^2}{k^2}\,\frac{c'd'}{s'^2}\right]$$
$$= \frac{k'^2}{k^4}\,\frac{a^4}{s'^2}\,\frac{d' - c'}{d' + c'}.$$

Semblablement, si, dans l'équation

$$x + y\sqrt{-1} = sn\left(P + Q\sqrt{-1}\right),$$

on considère Q comme constant et P comme le paramètre variable, on arriverait à la même équation, à la condition de remplacer x par $y\sqrt{-1}$, $y\sqrt{-1}$ par x et P par $Q\sqrt{-1}$. Il est facile d'effectuer ces substitutions dans l'équation précédente; mais, pour la mettre sous forme réelle, il faudra appliquer les formules connues :

$$s_2 = sn\left(Q\sqrt{-1},\, k\right) = \sqrt{-1}\cdot\frac{sn(Q,\, k')}{cn(Q,\, k')},$$

$$c_2 = cn\left(Q\sqrt{-1},\, k\right) = \frac{1}{cn(Q,\, k')},$$

$$d_2 = dn\left(Q\sqrt{-1},\, k\right) = \frac{dn(Q,\, k')}{cn(Q,\, k')}.$$

Ces formules seront également vraies, si on y remplace Q par 2Q et alors l'équation (6) à transformer devient, en posant S, C, D pour $sn 2Q$, $cn 2Q$, $dn 2Q$:

$$\left[x^2 + \left(y + \frac{aC}{kS}\right)^2 - \frac{a^2}{k^2}\frac{D}{S^2}\right]\left[x^2 + \left(y - \frac{aC}{kS}\right)^2 - \frac{a^2}{k^2}\frac{D}{S^2}\right] = \frac{k'^2}{k^2}\frac{a^4C^2}{S^2}\frac{1 - D}{1 + D}.$$

L'interprétation géométrique est la même que précédemment.

Réciproquement, on demande de mettre l'équation :

$$[(x-\alpha)^2 + y^2 - R^2][(x+\alpha)^2 + y^2 - R^2] - \frac{H^2}{4} = 0,$$

sous la forme

$$x + y\sqrt{-1} = a\,sn\left(P + Q\sqrt{-1}\right).$$

Il s'agit de déterminer a, k^2 et P, en fonction de α, R^2 et H^2.

Pour éviter un calcul d'élimination assez long, nous établirons d'abord une identité; partons de l'équation :

$$d'^2 - c'^2 = (1 - k^2) s'^2;$$

il vient successivement :

$$(d' + c')(d' - c')^2 = (1 - k^2) s'^2 (d' - c'),$$
$$(d' + c')(d'^2 - c'd')^2 = (1 - k^2) s'^2 (d' - c') d'^2,$$

et, par suite, en remplaçant d'^2 par $1 - k^2 s'^2$ dans plusieurs termes :

$$(d' + c')(1 - k^2 s'^2 - c'd')^2 = (1 - k^2) s'^2 (d' - c')(1 - k^2 s'^2),$$

ou bien :

$$\frac{1}{k^2 s'^2}\left(\frac{1}{k^2 s'^2} - 1 - \frac{c'd'}{k^2 s'^2}\right)^2 = \frac{1 - k^2}{k^4 s'^2} \cdot \frac{d' - c'}{d' + c'}\left(\frac{1}{k^2 s'^4} - 1\right),$$

qui est l'identité que nous proposons d'employer.

Or, on a pour valeurs de α, R^2 et H^2 en k, a, s', c', d' :

$$\alpha = \frac{a}{ks'}, \qquad R^2 = \frac{a^2 c'd'}{k^2 s'^2}, \qquad \frac{H^2}{4} = \frac{k^2}{k'^4} \cdot \frac{a^4}{s'^2} \cdot \frac{d' - c'}{d' + c}.$$

L'identité précédente devient donc :

$$\alpha^2 (\alpha^2 - a^2 - R^2)^2 - \frac{H^2}{4} (\alpha^2 - a^2) = 0.$$

Cette équation fera connaître les valeurs de a^2. Ces valeurs sont toujours réelles, car en substituant à a^2 dans le premier membre successivement $+\infty$, $\alpha^2 - R^2$, $-\infty$, on a $+\infty$, $-\frac{H^2}{4} \cdot R^2$, $+\infty$. Si l'on substitue à a^2 la valeur zéro, le résultat de la substitution est :

$$\alpha^2 \left[(\alpha^2 - R^2)^2 - \frac{H^2}{4}\right],$$

et si ce résultat est négatif, il y aura pour a^2 une racine positive admissible; l'autre racine serait négative et devrait être rejetée. Nous allons voir que, dans ce cas, on a aussi pour k^2 une valeur positive. En effet, on a obtenu l'équation :

$$\frac{a^4}{k^2} = \frac{H^2}{4} - \frac{m^2}{4},$$

mais on a aussi

$$\frac{m}{2} = \alpha^2 - R^2,$$

d'où :

$$\frac{a^4}{k^2} = \frac{H^2}{4} - (\alpha^2 - R^2).$$

On voit donc qu'il faut avoir :

$$\frac{H^2}{4} - (a^2 - R^2)^2 > 0,$$

pour que k soit réel; il y a alors une valeur admissible pour a^2 et une seule. On a ensuite :

$$sn\, 2P = \frac{a}{k\alpha}.$$

La première équation que nous venons d'établir fera connaître a, on aura ensuite k, en reportant dans l'équation en $\frac{a^4}{k^2}$ la valeur obtenue par a; enfin, la dernière équation fera connaître P au moyen des valeurs précédentes de a et de k. Pour achever la discussion, il faudrait examiner dans quels cas on a, pour k^2 et $\frac{a}{k\alpha}$, des valeurs absolument inférieures à l'unité. Le problème réciproque que nous nous étions posé est donc en principe résolu.

L'équation

$$TT' = \frac{H^2}{4},$$

pouvant en général être mise sous la forme

$$z = x + y\sqrt{-1} = a\,sn\left(P + Q\sqrt{-1}\right),$$

où Q désigne un paramètre variable; la considération de cette dernière équation mène à une construction de la tangente à la courbe tout à fait semblable à la construction connue de la tangente à l'ellipse.

On a, en effet, en différentiant :

$$dx + dy\sqrt{-1} = a\,cn\left(P + Q\sqrt{-1}\right) dn\left(P + Q\sqrt{-1}\right) dQ\sqrt{-1}.$$

La tangente est donc parallèle au vecteur :

$$\sqrt{-1}\cdot\sqrt{(-a+z)(a+z)\left(-\frac{a}{k}+z\right)\left(\frac{a}{k}-z\right)}.$$

Soient donc θ_1 θ_2, θ_3, θ_4 les angles faits avec ox par les vecteurs qui relient les points F, F', φ, φ' situés sur ox à des distances a, $-a$, $\frac{a}{k}$, $-\frac{a}{k}$ de l'origine, au point M qui a pour affixe (x, y); l'angle de la tangente avec ox sera égal à :

$$\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4).$$

On pourrait dire encore : Construisons sur OM le triangle OMP semblable au triangle OFM et semblablement placé; puis portons sur OP le vecteur OP' égal à k^2 OP, on aura en employant le langage des équipollences :

$$\text{PF} \,\underline{\Omega}\, \text{OF} - \text{OP} \,\underline{\Omega}\, \text{OF} - \frac{\text{OM}^2}{\text{OF}} \,\underline{\Omega}\, a - \frac{z^2}{a},$$

$$\text{P'F} \,\underline{\Omega}\, \text{OF} - \text{OP'} \,\underline{\Omega}\, \text{OF} - k^2\frac{\text{OM}^2}{\text{OF}} \,\underline{\Omega}\, a - \frac{z^2}{a}k^2.$$

La tangente sera donc perpendiculaire au vecteur

$$\sqrt{\mathrm{PF}\cdot\mathrm{P'F}}\,\underline{\Omega}\sqrt{\frac{(a^2-z^2)(a^2-k^2z^2)}{a}};$$

c'est-à-dire parallèle à la bisectrice extérieure de l'angle PFP′; on a donc ainsi une deuxième construction très simple de la tangente.

Il serait intéressant de trouver une interprétation mécanique à l'équation envisagée. Si nous considérons par exemple, l'équation :

$$x+y\sqrt{-1}=a\sin\left(t+q\sqrt{-1}\right),$$

où q est une constante et où t représente le temps, on obtient par différentiation :

$$x''+y''\sqrt{-1}=-a\sin\left(t+q\sqrt{-1}\right)=-a\left(x+y\sqrt{-1}\right),$$

d'où :

$$x''=-ax,$$
$$y''=-ay.$$

ce qui prouve que l'ellipse considérée est le lieu décrit par un point de masse unité sollicité par une force dirigée vers l'origine suivant le rayon vecteur r et égal à ar.

Examinons donc dans quel cas une force X, Y dérivant d'un potentiel peut être mise sous la forme

$$\text{(7)}\qquad \mathrm{X}+\mathrm{Y}\sqrt{-1}=f\left(x+y\sqrt{-1}\right).$$

S'il y a une fonction de forces, on aura :

$$\frac{\partial \mathrm{X}}{\partial y}=\frac{\partial \mathrm{Y}}{\partial x}.$$

Mais, en vertu de l'équation précédente (7), on a :

$$\frac{\partial \mathrm{X}}{\partial y}=-\frac{\partial \mathrm{Y}}{\partial x}.$$

On a donc, par comparaison :

$$\frac{\partial X}{\partial y} = \frac{\partial Y}{\partial x} = 0,$$

ou :

$$X = \varphi(x), \qquad Y = \psi(y),$$

et comme on doit avoir aussi :

$$\frac{\partial X}{\partial x} = \frac{\partial Y}{dx},$$

chacune de ces quantités est constante, car autrement il y aurait une relation entre les variables x et y, ce qui est absurde, puisque ce sont les variables indépendantes. On aura donc :

$$\varphi(x) = c(x - x_0),$$
$$\psi(y) = c(y - y_0),$$

et l'on retombe alors, suivant le signe de c, sur les ellipses ou les hyperboles que nous avons considérées au début.

Il ne semble donc pas possible de trouver pour les familles de courbe

$$x + y\sqrt{-1} = sn\left(P + Q\sqrt{-1}\right),$$

que nous avons considérées, une interprétation mécanique simple; analogue à celle qui s'offre à l'esprit, quand on envisage l'équation complexe des ellipses et hyperboles :

$$x + y\sqrt{-1} = \sin\left(p + q\sqrt{-1}\right).$$

J.-B. Pomey.



DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE

DU COEFFICIENT α POUR DIFFÉRENTS MÉTAUX ET ALLIAGES

Les *Annales Télégraphiques* ont publié, il y a quelques années (tome XV, p. 409), une étude de M. Lagarde, ingénieur des télégraphes, contenant notamment la description des appareils qui lui avaient servi pour déterminer la valeur du coefficient α d'augmentation de résistance électrique par degré de température, et les précautions qu'il avait prises, pour éliminer les causes d'erreurs dans les mesures se rapportant à ces essais.

Nous rappellerons sommairement l'installation qui fut faite alors, et les résultats qu'elle donna.

Le conducteur à expérimenter était enroulé sur un tambour en bois portant des réglettes d'ébonite, creusées d'une série régulière de cannelures, leur permettant de recevoir le fil.

Le tambour est très largement évidé sur ses bases et sur sa surface latérale; l'air qui baigne le fil peut ainsi circuler librement autour des spires, et le métal prend assez rapidement la température du milieu environnant.

Le cylindre étant garni, on le plaçait verticalement dans une double étuve métallique, hermétiquement close, qu'une couronne de gaz, brûlant à la partie inférieure, permettait de chauffer.

Deux thermomètres bien comparables plongeaient

dans l'enceinte intérieure, l'un vers le haut, l'autre près du fond et on admettait que la température moyenne du conducteur était le résultat $\frac{t + t'}{2}$ de la lecture des indications de ces appareils.

Un robinet convenable servait à régler l'arrivée du gaz suivant les besoins.

Pour faire une opération, on opère de la manière suivante : après avoir évalué très exactement la résistance électrique des conducteurs auxiliaires, on les attache aux deux bornes, sous lesquelles sont déjà prises les extrémités des fils à mesurer. L'ensemble est ensuite introduit dans l'étuve et, au bout d'un temps suffisant pour que le fil acquière la température de l'air qui l'entoure, on prend la résistance R_1 de ce fil, par la méthode du pont de Wheatstone et en faisant usage d'un galvanomètre à miroir très sensible. On note en même temps les indications données par les deux thermomètres qui plongent dans l'étuve, et on admet que la moyenne de leurs indications représente la température initiale t_1 du fil.

La lampe à gaz, au-dessous de l'étuve, est ensuite allumée; toutes les cinq minutes, on relève la température approchée du conducteur et on mesure sa résistance électrique, deux choses qui augmentent ensemble. Quand la température est voisine de celle à laquelle on veut s'arrêter, la quantité de gaz qui arrive dans la lampe est diminuée progressivement; au bout d'un certain temps, il n'y a plus de variation, ni dans la résistance du fil, ni dans les indications des thermomètres.

La moyenne des températures étant notée, on établit l'équilibre du pont, ce qui donne des valeurs

R_2 et t_2 que l'on considère comme provisoires; après cinq minutes, on vérifie si l'état stable se maintient; cette opération est répétée jusqu'au moment où on obtient les mêmes chiffres, aux thermomètres et à la boîte de résistance, dans quatre essais se succédant de cinq en cinq minutes.

Lorsque ce résultat était atteint, les nombres trouvés étaient tenus pour exacts et définitifs.

En suivant la même marche pour une température t_3, on déterminait une résistance R_3, ce qui permettait de trouver, par le calcul, deux coefficients α et β applicables à la formule générale :

$$R_\theta = R_0(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2).$$

En négligeant le terme en β, qui fut trouvé inférieur à 0,0000015, M. Lagarde arrive, pour α, aux valeurs portées dans le tableau suivant :

TABLEAU I

Cuivre de haute conductibilité.

NUMÉROS des expériences	RÉSISTANCE kilométrique à 0° pour un fil de 1 millim. de diamètre	CONDUCTIBILITÉ rapportée à 20°,34 p. 100	VALEUR du coefficient α	OBSERVATION
1	20ω,806	97,77	0,00391	Moyenne du coefficient $\alpha = 0,00402$.
2	21 ,140	96,18	0,00406	
3	20 ,098	101,21	0,00419	
4	19 ,799	102,74	0,00408	
5	20 ,542	98,90	0,00384	

Des essais analogues furent effectués sur des fils de bronze à grande résistance mécanique; les résultats

que l'on obtint sont consignés dans le tableau II, analogue au précédent.

TABLEAU II

Bronze à grande résistance mécanique.

NUMÉROS des expériences	RÉSISTANCE kilométrique à 0° pour un fil de 1 millim. de diamètre	CONDUCTIBILITÉ rapportée à 20^{ω},34 p. 100	VALEUR du coefficient α	OBSERVATION
1	56^{ω},693	35,88	0,00152	Moyenne du coefficient $\alpha = 0,00152$.
2	58 ,519	34,79	0,00153	
3	58 ,463	34,98	0,00151	

En comparant les chiffres des tableaux I et II, M. Lagarde s'aperçut que si on multipliait la conductibilité par le coefficient α, puis qu'on fasse la moyenne dans chacune des séries, le produit définitif était pour le fil de cuivre 0,0822 et pour le fil de bronze de 0,0881, chiffres pouvant être pris l'un pour l'autre, avec une erreur relative de 0,07 seulement.

La conductibilité d'un fil et le coefficient d'augmentation de résistance avec la température, semblaient ainsi liés par une sorte de proportionnalité et l'auteur était en droit de se demander si ce rapport était vrai seulement pour du bronze à 35 p. 100 de conductibilité, ou bien s'il était la conséquence d'une loi applicable à tous les fils provenant des alliages du cuivre et de l'étain.

En 1893 (*Annales Télégraphiques*, tome XX, p. 235), M. Lagarde, reprenant ses essais sur du cuivre fabriqué

spécialement pour se trouver dans des conditions de pureté parfaite, arrivait à la valeur de $19^{\omega},58$ pour la résistance à 0° d'un fil de 1 millimètre de diamètre.

La variation de cette résistance, mesurée à diverses températures entre 0° et 41°, lui donna comme coefficient α, une série de valeurs comprises entre 0,00433 et 0,00458 avec une moyenne de 0,00445.

En appliquant la règle de la proportionnalité, que nous citions plus haut, il se crut autorisé à dresser le tableau suivant :

TABLEAU III

CONDUCTIBILITÉ du cuivre		VALEUR des coefficients α correspondants	CONDUCTIBILITÉ du cuivre		VALEUR des coefficients α correspondants
par rapport à $20^{\omega},34$ p. 100	par rapport à $19^{\omega},58$ p. 100		par rapport à $20^{\omega},34$ p. 100	par rapport à $19^{\omega},58$ p. 100	
93,5	90	0,00400	99,8	96	0,00427
94,5	91	0,00405	100,8	97	0,00432
95,6	92	0,00409	101,9	98	0,00436
96,6	93	0,00414	102,9	99	0.00441
97,6	94	0,00418	104,0	100	0,00445
98,7	95	0,00423			

L'étalon adopté jusqu'ici pour base ayant $20^{\omega},34$ de résistance, sa conductibilité n'est par suite que les $\frac{96,26}{100}$ de celle du cuivre pur, et le coefficient α correspondant doit être $\alpha = 0,00428$.

Faisons remarquer tout de suite les différences qu'il y a entre les deux séries d'essais; les chiffres du tableau III sont, en effet, notablement supérieurs à ceux portés au tableau I.

Nous demandons pardon au lecteur de nous être un peu étendus sur le résultat de ces expériences, mais la loi générale que donnait M. Lagarde aurait eu une telle importance, si elle avait été confirmée, que nous avons cru bon de reproduire complètement les chiffres sur lesquels il s'est appuyé pour la formuler.

A la suite des essais dont nous venons de parler, l'Administration des Télégraphes inscrivit dans ses cahiers des charges que la valeur du coefficient α était égale à 0,0015 pour les fils de bronze à grande résistance mécanique; le coefficient du cuivre 0,0039 adopté depuis longtemps fut conservé : ce sont encore ces deux chiffres qui sont en usage.

Mais, par suite des progrès de la métallurgie, les fils de bronze fabriqués actuellement sont bien différents, au point de vue électrique, de ceux que l'on possédait il y a quinze ans; les conductibilités qui alors n'arrivaient pas à 40 p. 100 atteignent et dépassent aujourd'hui 60 p. 100. Il y avait lieu, par suite, de rechercher si les coefficients, exacts en 1883, pouvaient toujours s'appliquer aux conducteurs de date plus récente, et, dans le cas contraire, de savoir l'importance de l'erreur commise en les employant.

C'est dans le but d'élucider cette question, que M. Massin, ingénieur chargé de la vérification du matériel télégraphique, m'a fait entreprendre une série d'expériences portant sur tous les fils d'un emploi usuel dans la télégraphie; c'est le résumé de ces recherches, que je soumets aujourd'hui aux lecteurs des *Annales Télégraphiques*.

En dehors de l'intérêt scientifique et industriel que

ces études peuvent présenter, elles ont, pour le service spécial qui a effectué les essais, une grande importance. Étant donné en effet que la résistance des fils varie avec leur température, il est indispensable, si on veut connaître la conductibilité relative du métal qui les compose, de la comparer à un étalon placé dans les mêmes conditions physiques ou, ce qui est plus pratique, de savoir la valeur du coefficient qui permettra de faire la correction nécessaire.

Sans insister plus longuement sur ce point, nous allons exposer, en premier lieu, les considérations qui nous ont amené à monter un appareil différent de celui de M. Lagarde, puis, nous décrirons en détail les dispositifs que, maintenant, nous n'allons qu'indiquer.

L'installation qui avait servi à M. Lagarde pour ses mesures, devait-elle encore être employée pour des opérations analogues, ou valait-il mieux essayer d'une autre méthode ?

En examinant soigneusement la question, nous sommes arrivés à conclure que le premier système avait pu donner des résultats exacts, mais qu'il comportait en lui-même des causes d'erreurs d'ailleurs difficiles à éviter avec les appareils dont on disposait à cette époque.

Si nous extrayons quelques chiffres des expériences, nous voyons qu'un fil mesuré à 16° et à 45°, a donné dans le premier cas $0^{\omega},256$ et dans le deuxième $0^{\omega},272$, soit $0^{\omega},016$ de plus.

Quelle confiance peut-on avoir dans ce résultat? La détermination d'une résistance par le pont de Wheatstone peut-elle pratiquement être obtenue à moins de 1 millième d'ohm près? Si on considère que

l'équilibre se fait par l'intermédiaire de bobines qui ne sont pas rigoureusement exactes, que les communications entre elles sont établies par des fiches, que pour équilibrer cette résistance, il faut ajouter, retrancher, en un mot se servir de bobines différentes pour deux mesures, ne trouvons-nous pas dans toutes ces causes des chances d'erreurs tout à fait indépendantes du soin apporté aux mesures? A un autre point de vue, les fils auxiliaires ne sont ni entièrement dans l'étuve, ni complètement en dehors, comment dès lors apprécier la variation de résistance qu'ils subissent lorsque la température s'élève?

Si nous examinons la forme de l'étuve, nous ferons de nouvelles réserves. Suivons, en effet, la marchè d'une opération : au moment où commencent les expériences, la température est bien équilibrée dans l'intérieur, et les deux thermomètres donnent des indications semblables. Lorsque la lampe à gaz fonctionne, la partie supérieure de l'étuve s'échauffe plus que la partie inférieure; à partir de ce moment, les thermomètres ne sont plus en concordance; nous avons expliqué que c'était la moyenne arithmétique des deux lectures simultanées qui était considérée comme étant la température vraie du fil.

Quelle erreur commet-on dans ce cas? Il est difficile de le savoir, car la décroissance de la température n'est sûrement pas régulière; il suffit de mettre un thermomètre au milieu de la hauteur pour s'en assurer. Enfin, l'essai sur une longueur de 100 mètres de fil n'est pas toujours possible; en outre, les manœuvres qu'exigent l'enroulement et le déroulement ralentissent les essais.

Nous le répétons, ces critiques n'ont pas pour but

de déprécier la méthode, qui, nous l'avons constaté, donne des résultats satisfaisants; notre intention est de montrer les objections qu'on peut faire et de justifier les raisons qui nous ont fait abandonner cette installation pour en établir une autre, sinon parfaite, tout au moins présentant des avantages que nous ne trouvions pas dans la première.

L'appareil de mesure dont nous nous sommes servi est le Pont de Thomson dont la description a paru dans la livraison de septembre-octobre 1895 de ce recueil.

L'emploi de cet instrument, établi spécialement pour mesurer de très petites résistances, nous a permis de tourner toutes les difficultés que nous avons eu à signaler. Il nous a été possible, en effet, d'expérimenter des fils n'ayant que quelques décimètres de longueur; l'étuve qui les contenait ayant des dimensions très réduites, on a obtenu une température à peu près uniforme dans tout l'intérieur et, le conducteur, plié en zigzags, s'est trouvé dans une couche isotherme.

L'appareil en lui-même nous a également offert de très grands avantages. Nous savons que, dans ce dispositif de pont, les résistances auxiliaires, dues aux contacts et aux fils de secours, ne s'ajoutent pas à la résistance à mesurer. Comme l'équilibre s'obtient par le déplacement d'un curseur le long d'un fil de maillechort, on a ainsi un point de contact unique et la partie du fil d'équilibre qui a servi dans une première opération sert encore dans les opérations suivantes, les deux principales causes d'erreurs que nous avons montrées dans le pont de Wheatstone sont éliminées.

Description de l'étuve. — Le seul moyen pratique d'arriver à déterminer la résistance électrique d'un fil à diverses températures, consiste évidemment à le maintenir pendant un certain temps à ces températures, puis, à le mesurer au moyen d'instruments appropriés.

On est amené ainsi à le mettre dans une enceinte disposée pour être chauffée ou refroidie suivant les besoins; pour apprécier le degré thermique des objets qu'elle contiendra, on la munit d'un thermomètre plongeant dans l'intérieur, mais en ayant soin de laisser la graduation visible en dehors.

Après divers tâtonnements, sur lesquels nous n'insisterons pas, nous avons reconnu que pour arriver à un bon résultat, la première des conditions à réaliser était d'obtenir une variation de température lente et régulière. De plus, le fil en essai sera mis complètement à l'abri du rayonnement direct du chauffage; la capacité de l'enceinte doit être peu considérable; la forme de cette enceinte doit donner une faible hauteur afin que la température soit bien constante dans tout l'intérieur.

L'étuve qui a été construite pour satisfaire à ces desiderata, est composée de la manière suivante :

Une première boîte en bois A (*fig.* 1), ayant comme dimensions $0{,}40 \times 0{,}20 \times 0{,}10$, forme la partie extérieure de l'ensemble; l'épaisseur des parois est de 15 millimètres.

Cette boîte est doublée intérieurement, dans le fond et jusqu'à la moitié de sa hauteur, par une feuille de plomb la rendant, dans cette partie, absolument étanche et susceptible de recevoir le mélange réfri-

gérant dans le cas où on ferait des essais à basse température.

Le dispositif de chauffage qui a été employé se

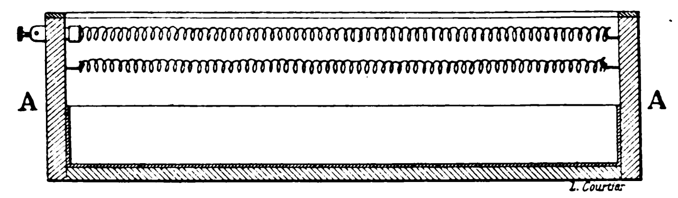


Fig. 1. — Coupe de la boîte extérieure A.

compose d'un radiateur électrique, formé par un long boudin en fil de fer de 1 millimètre, faisant deux fois le tour de l'intérieur de la caisse. Ce fil, qui est maintenu dans la position convenable au moyen de clous fixés dans les angles, a ses extrémités prises sous deux bornes, sortant à l'extérieur, et permettant d'y accrocher les communications.

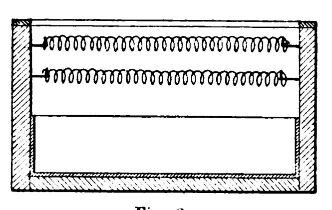


Fig. 2.
Coupe de la boîte extérieure A.

La résistance électrique du radiateur à la température de 15° est de 4 ohms.

Le courant, pris sur un circuit d'éclairage de 70 volts, traverse une résistance de 6 ohms et un ampère-mètre; il passe ensuite dans le radiateur et retourne à la machine.

Un rhéostat variable (système Cance de 12 ohms), monté en dérivation entre les deux bornes du radiateur, sert pour le réglage. Lorsqu'il est mis hors du circuit, le courant passe entièrement dans les fils chauffeurs avec une intensité de 7 ampères, ce qui

élève leur température et par suite celle de l'étuve ; si on veut maintenir pendant un certain temps une chaleur constante, il suffit d'intercaler le rhéostat variable et, par tâtonnement, de déterminer la place de la molette, qui permettra de ne laisser passer, dans les fils du radiateur, que l'intensité nécessaire pour compenser les pertes de calorique (*fig.* 3).

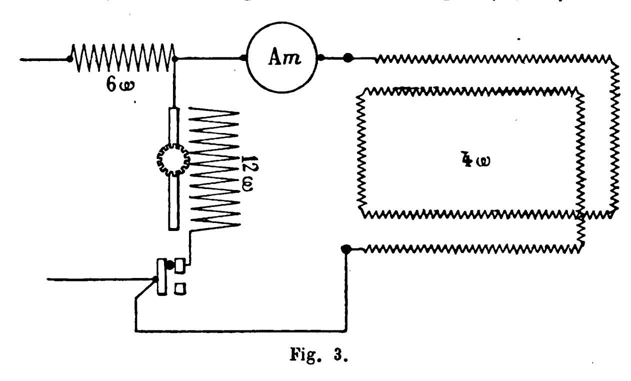


Fig. 3.

Ce dispositif a paru préférable à celui qui consisterait à monter en série, sur le circuit de la dynamo, des résistances réglables.

Comme on est amené à faire varier le courant entre des limites de 7 ampères et 0,1 ampère, les rhéostats auraient dû être construits pour prendre les valeurs de 5 ohms à 700 ohms, ce qui, en l'espèce, n'aurait pas été sans présenter des difficultés assez sérieuses.

Pour éviter les pertes de chaleur par les joints, les bords supérieurs de la caisse sont garnis d'une bande de feutre, clouée à plat. Une bande analogue est en dessous du couvercle, et, lorsque celui-ci est mis, on arrive à une obturation à peu près complète.

La deuxième partie de l'étuve se compose d'une seconde boîte B, également en bois, pouvant, lors-

qu'elle est retournée, entrer dans la première (*fig.* 4, 5 et 6).

La paroi que nous appellerons le fond, se trouve

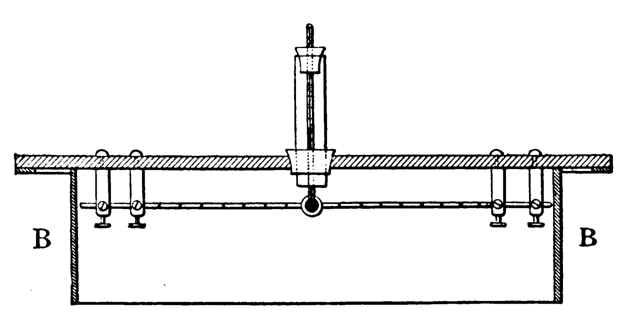


Fig. 4. — Coupe de la boite intérieure B.

ainsi à la partie supérieure, et ses dimensions sont suffisantes pour qu'elle puisse servir de couvercle à la grande boîte; les quatre autres côtés sont cloués sur le fond, mais assez loin des bords, afin que l'introduction de l'ensemble à l'intérieur du radiateur soit possible.

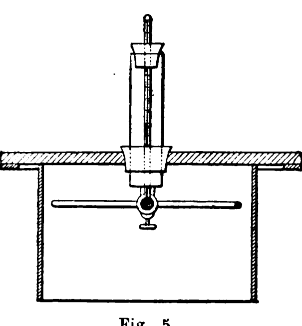


Fig. 5.
Coupe de la boite intérieure B.

La profondeur de la boîte B étant moins grande que celle de la caisse extérieure A, il reste, après le montage, un espace de 2 centimètres entre le fond de cette dernière et le bord de la boîte B.

On voit que, par cette disposition, on réalise d'une façon satisfaisante les conditions qui étaient imposées. Le fil à essayer, placé à l'intérieur de B, sera à l'abri du rayonnement direct du radiateur; le courant de la

machine élève la température entre les deux enveloppes, en même temps qu'il échauffe les parois très minces de la boîte intérieure.

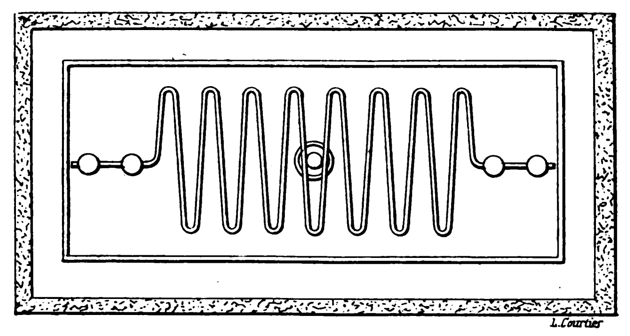


Fig. 6. — Vue en dessous du couvercle.

Les gaz chauds ne passent que lentement par l'ouverture inférieure de B ; dans leur mouvement ascensionnel ils cèdent au fil en essai et au réservoir du thermomètre, qui se trouve au même niveau, une partie de leur chaleur.

Par expérience, on a constaté qu'on se trouve dans de bonnes conditions pour les essais, lorsque la température monte de 1 degré par deux minutes. La mesure peut être faite à tous les instants, mais, par prudence et pour éviter toute chance d'erreur, nous avons toujours maintenu l'équilibre pendant dix minutes avant d'admettre le chiffre trouvé comme définitif.

Le thermomètre qui a été employé est du modèle à réservoir sphérique avec tube capillaire très fin. Comme on le voit sur le dessin, son extrémité supérieure est enfilée dans un bouchon, entrant lui-même dans un tube de verre. L'ouverture du couvercle, par où passe le tube, est munie d'une bague en caout-

chouc pour empêcher les fuites. On conçoit que par ce montage, le thermomètre tout entier se trouvant dans une enceinte de même température, la précision des lectures est beaucoup plus grande.

Cette partie de l'appareil étant décrite, il nous suffira de quelques mots pour expliquer comment les communications sont amenées au fil à l'intérieur de l'étuve.

Sur la paroi formant couvercle de la grande boîte, on a vissé quatre bornes en bois dont le dessin donne une coupe et une vue en plan (*fig.* 7 et 8).

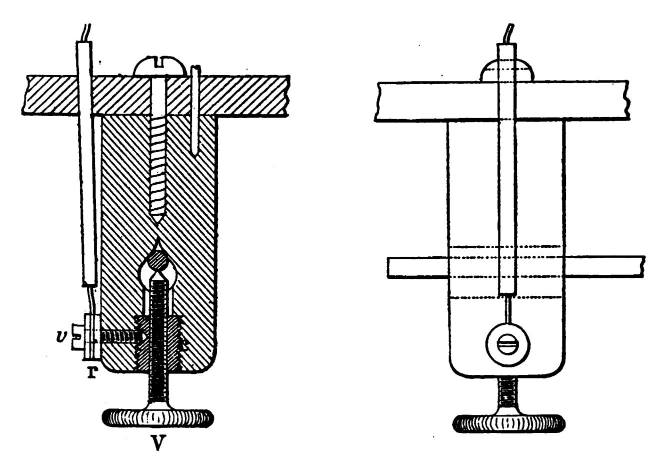


Fig. 7 et 8.

Un bloc de cuivre C est entré à l'extrémité de la borne; le trou taraudé suivant son axe sert au passage d'une vis à tête moletée V, permettant de pincer le fil *f*, entre la pointe et le bois formant le corps de la pièce.

La communication électrique s'établit par l'intermédiaire d'un fil, soudé sur une rondelle métallique *r'*.

Cette dernière est prise sous la tête de la vis transversale *v*, pénétrant dans le bloc de cuivre.

Il y a quatre bornes semblables communiquant respectivement : les deux extrêmes avec les boutons du Pont de Thomson marqués *courant*; les deux autres aux boutons marqués *dérivation*. Nous rappellerons que la résistance à mesurer est précisément cette dérivation : c'est la partie du fil comprise entre les deux bornes du milieu.

Résultat des essais. — Les expériences ont porté sur différents fils susceptibles d'être utilisés en télégraphie ou en téléphonie.

Les chiffres obtenus ont servi pour la construction de courbes, dans lesquelles on a porté en abscisses les résistances trouvées, et en ordonnées les températures correspondantes.

Comme nous avons essayé des fils de différentes provenances, le nombre des essais a été très considérable. En comparant alors les graphiques, on a pu faire deux constatations intéressantes. La première, c'est que la valeur du coefficient pour des fils de même conductibilité, mais ayant des provenances diverses, est très sensiblement le même ; les erreurs qu'on peut commettre, dans les conditions ordinaires où se font les mesures, sont négligeables si on prend le coefficient du fil d'une usine ou celui correspondant au fil d'une autre usine.

D'autre part, si, ayant d'abord indiqué les points par où doit passer la courbe, on les réunit, on s'aperçoit que tous ces points se trouvent généralement sur une ligne droite; dans quelques cas où des différences existent entre la ligne droite et la

courbe, ces différences sont tellement petites, qu'en pratique on peut admettre que l'équation de toutes ces courbes est du premier degré et correspond, si, on prend R_0 comme origine, à la formule

$$R_\theta = R_0(1 + \alpha\theta).$$

Pour préciser les idées nous donnons ci-dessous deux courbes, l'une correspondant au fil de cuivre, l'autre au fil de fer (*fig.* 9).

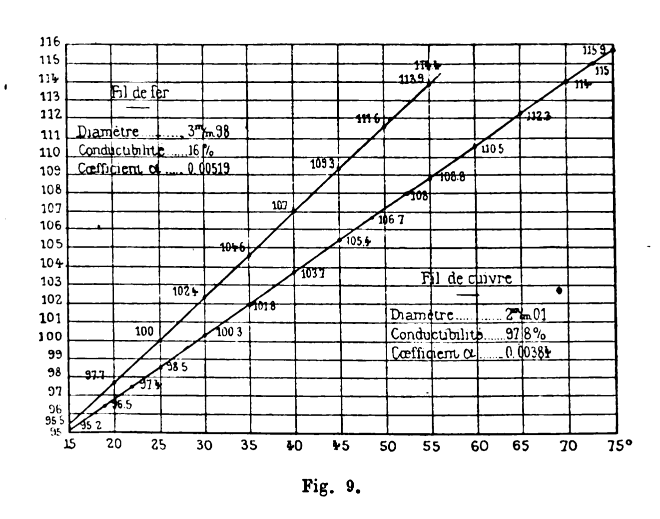


Fig. 9.

On voit que les courbes ne diffèrent de la ligne droite que d'une façon insensible, mais pour pousser plus loin nos recherches nous avons tracé des courbes à très grande échelle, en nous servant d'un nombre de mesures considérable. En joignant alors les deux points extrêmes par une ligne droite, j'ai constaté que cette ligne, relativement à la première, était parfois au-dessus, parfois au-dessous, d'autres fois la coupait en un ou plusieurs points.

Pour l'interprétation de nos résultats nous nous sommes demandé à quelle cause il fallait rapporter ces irrégularités.

Devait-on les attribuer à d'autres coefficients supplémentaires, ou fallait-il les considérer comme des erreurs imputables aux mesures ?

Nous pensons que c'est surtout la première de ces causes qui est en jeu, car, en essayant deux longueurs de fil se succédant sur une même couronne, nous avons trouvé le même résultat, tandis qu'en prenant deux fils ayant une conductibilité égale, mais dont la provenance n'était pas la même, nous n'avons pas repassé exactement par les mêmes points.

Hâtons-nous de dire d'ailleurs, que ces différences sont toujours très petites, et que, d'une façon générale, le coefficient α est suffisant dans la pratique comme l'expérience nous l'a montré. Par le calcul nous avons trouvé que le coefficient β applicable au deuxième terme de la série

$$R_\theta = R_0(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2),$$

était toujours de l'ordre de 10^{-6}, avec un signe positif ou négatif ; dans ces conditions, il ne pourrait influer sur la valeur de R_θ que si le fil était porté à une température qu'il ne subira jamais dans les circonstances usuelles.

C'est en nous basant sur ces considérations que nous avons pensé qu'il était préférable de réunir les résultats dans un tableau unique plutôt que de donner les courbes se rapportant à tous les essais.

Les coefficients α ont été déterminés, en prenant les résistances aux deux températures extrêmes, t_1 et

t_2. Nous avons ainsi obtenu deux équations :

$$R_{t_1} = R_0(1 + \alpha t_1),$$
$$R_{t_2} = R_0(1 + \alpha t_2).$$

En résolvant, on déduit :

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}.$$

TABLEAU IV

NUMÉROS	NATURE DU FIL	CONDUCTIBILITÉ p. 100	COEFFICIENT α d'augmentation de résistance par degré de température
1	Cuivre de haute conductibilité. . . .	97,8	0,00384
2	Fil de bronze	62,2	0,00248
3	—	55,9	0,00224
4	—	38,4	0,00141
5	Cuivre recuit pour câbles.	100,0	0,00429
6	— —	101,0	0,00430
7	Bronze à 10 p. 100 d'aluminium. . .	13,4	0,000705
8	Laiton	22,5	0,00014
9	Fil de fer	16,0	0,00519
10	—	13,5	0,00432
11	—	11,6	0,00391
12	Fil d'aluminium	66,0	0,00415
13	Fil bimétallique Martin	60,5	0,00381
14	Fil bimétallique avec âme de bronze.	57,0	0,00363

Discussion de la méthode. — Nous nous bornerons dans cette partie de notre étude, à indiquer les précautions que nous avons prises pour donner aux essais toute la précision que ces recherches exigent.

Pour avoir un très grand nombre de points limitant nos courbes, et, par suite, pour pouvoir tracer celles

ci avec exactitude, nous avons toujours fait varier la température du fil dans de larges limites.

Dans certaines expériences nous avons pris des mesures fréquentes entre 0° et 160°, mais, d'une manière générale, nous n'avons pas dépassé 70°, ce qui est déjà bien au delà, des plus mauvaises conditions dans lesquelles pourront se trouver les conducteurs. Afin de nous assurer qu'aucune erreur n'avait été commise, et notamment que la différence entre la température réelle du fil et celle indiquée par le thermomètre était nulle, nous avons fait tous les essais en deux parties : la première, en élevant la température comme nous l'avons indiqué ; la deuxième, en laissant refroidir l'appareil. Nous avons ainsi obtenu deux séries de chiffres qui ont donné des courbes correspondant à l'aller et au retour. Or, en construisant, on constate que ces lignes se superposent en tous les points.

Les valeurs trouvées peuvent donc être considérées comme exactes, dans les limites des choses possibles.

Conclusion. — Quelle conclusion doit-on tirer de ces expériences? la loi que M. Lagarde avait énoncée se trouve-t-elle confirmée ou infirmée par ces nouveaux essais ?

Pour répondre à ces questions reportons-nous au tableau IV et posons la suite d'égalités :

$$\frac{0,00384}{97,8} = \frac{A}{62,2} = \frac{B}{55,9} = \frac{C}{38,4} = \frac{D}{100} = \frac{E}{101},$$

dans lesquelles, les dénominateurs sont les conductibilités des différents fils de cuivre et de bronze es-

sayés, et les numérateurs A, B, C, D, E, représentent des coefficients proportionnels à celui du cuivre télégraphique ordinaire. On trouve en effectuant les opérations :

$$\frac{0{,}00384}{97{,}8} = \frac{0{,}00244}{62{,}2} = \frac{0{,}00219}{55{,}9} = \frac{0{,}00150}{38{,}4} = \frac{0{,}00392}{100} = \frac{0{,}00396}{101}.$$

Ces fractions ne diffèrent que très peu de celles qu'on obtiendrait en prenant les valeurs déduites des expériences, et qui sont :

$$\frac{0{,}00384}{97{,}8},\quad \frac{0{,}00248}{62{,}2},\quad \frac{0{,}00224}{55{,}9},\quad \frac{0{,}00141}{38.4},\quad \frac{0{,}00429}{100},\quad \frac{0{,}00430}{101}.$$

En faisant abstraction des deux dernières, se rapportant à un métal très pur et recuit, on peut constater que pour des alliages de cuivre avec une petite quantité d'étain, les coefficients trouvés sont très sensiblement ceux que devait donner l'application de la règle.

Pour du cuivre très pur, on trouve des coefficients un peu supérieurs aux chiffres se rapportant à la proportionnalité. Cette anomalie, que nous ne pouvons pas expliquer actuellement, avait également été constatée par M. Lagarde, et nous avons eu soin de la souligner en parlant de ses expériences.

Nous rappelons qu'en soumettant aux essais du cuivre recuit, ayant 104 p. 100 de conductibilité, il était arrivé au chiffre de 0,00445.

La loi n'est plus vérifiée lorsqu'on opère sur des alliages contenant du cuivre et une quantité notable d'un autre métal ; cet écart s'accentue, du reste, à mesure que le titre de l'alliage s'abaisse.

C'est ainsi que le bronze à 90 p. 100 de cuivre et

10 pour 100 d'aluminium a pour coefficient 0,0007, tandis qu'en prenant pour base sa conductibilité, ce coefficient devrait être de 0,0005 seulement.

Le laiton, qui n'a pas d'usage télégraphique comme conducteur, mais qui a été essayé pour donner toute une échelle de métaux à base de cuivre ayant des conductibilités différentes, le laiton a donné un coefficient de 0,0014, au lieu de 0,0009 que le calcul aurait fait supposer.

De là une première conclusion : Dans les alliages à base de cuivre, le coefficient d'augmentation de résistance par degré de température varie dans le même sens que la conductibilité ; il est sensiblement proportionnel à cette conductibilité, lorsqu'il s'agit d'alliages ayant une composition chimique presque identique.

Étudions de la même manière les résultats obtenus avec les échantillons de fil de fer que nous avons essayés. Ces fils, au nombre de trois, proviennent d'une même fabrication, bien qu'il y ait entre eux des différences de conductibilité relativement très grandes.

En appliquant le même raisonnement que pour les fils de cuivre, nous pourrons poser la suite de termes :

$$\frac{0,00519}{16} = \frac{A}{13,46} = \frac{B}{11,6},$$

qui donne, en remplaçant les lettres par leur valeur :

$$\frac{0,00519}{16} = \frac{0,00436}{13,46} = \frac{0,00375}{11,6}.$$

Les chiffres aux numérateurs ne diffèrent que très peu de ceux que les essais ont fournis, et qui sont :

$$\frac{0,00519}{16}, \quad \frac{0,00432}{13,46}, \quad \frac{0,00391}{11,6}.$$

Nous sommes donc en droit de conclure : la conductibilité des fils de fer et leur coefficient d'augmentation de résistance par degré de température varient dans le même sens ; les deux termes restent sensiblement proportionnels tant que la composition chimique de l'alliage est peu différente ; il n'y a aucun rapport entre la conductibilité et le coefficient d'un métal et la conductibilité et le coefficient d'un autre métal.

Le fer et le cuivre, ce dernier pur ou allié à l'étain et à l'aluminium, étant les seuls métaux d'un usage courant dans la contruction des lignes ou des machines, il n'a pas été fait de recherches sur d'autres corps.

Il nous a cependant semblé utile de déterminer les coefficients qui sont applicables aux fils d'aluminium et aux fils composés, employés parfois dans les constructions ; nous en avons formé un groupe spécial dans notre tableau, il est d'ailleurs prudent de n'adopter ces chiffres que pour des conducteurs, d'une qualité électrique voisine de celle qui a servi à les établir.

G. DUBREUIL.

INTERRUPTEURS RAPIDES

POUR BOBINES D'INDUCTION (*)

Pour mettre en évidence l'attraction mutuelle des courants électriques cheminant parallèlement dans un solénoïde, on fait, dans les cours de physique, l'expérience suivante, due au physicien Roget. Le professeur forme, avec un long fil de cuivre, une spirale dont il redresse les extrémités sur une longueur de quelques centimètres, puis il fixe ce petit appareil à un support, de telle sorte que l'extrémité inférieure de la tige rectiligne terminant la spirale vienne affleurer la surface d'un bain de mercure. En lançant alors le courant électrique à travers la spirale, ce qui se fait en plongeant dans le mercure l'un des rhéophores amenant le courant, tandis que l'autre est mis en contact avec l'extrémité supérieure de la spirale, on voit les spires se rapprocher brusquement, d'où interruption de contact entre la tige de cuivre et le mercure; le courant cesse par conséquent de circuler; mais, par suite de l'élasticité de la spirale qui reprend sa position primitive, le phénomène recommence et donne lieu à une oscillation rapide de la spirale.

Cette expérience de pure démonstration nous a suggéré l'idée de construire un véritable interrupteur

(*) *La Nature*, n° 1291.

pour les bobines d'induction, afin de remplacer l'interrupteur Foucault à peu près exclusivement employé jusqu'à ces dernières années, mais auquel on reproche son peu de régularité de fonctionnement et une vitesse insuffisante dans bien des cas pour effectuer la radiographie. Un appareil aussi simple que l'est la spirale classique de Roget peut rendre les mêmes services que des appareils compliqués et coûteux, il faut seulement y apporter certaines modifications dont nous avons donné connaissance à la Société de physique et d'histoire naturelle de Genève, dans sa séance du 3 juin 1897. L'hélice est formée d'un nombre restreint de spires d'un gros fil de cuivre, elle est placée entièrement dans l'intérieur d'une éprouvette ou d'une simple bouteille à large goulot. L'extrémité inférieure de l'hélice est redressée sur 6 à 8 centimètres de longueur, elle vient plonger dans du mercure contenu au fond de la bouteille et recouvert lui-même d'une couche d'eau. L'extrémité supérieure de la spirale est adaptée à un bouchon qui ferme complètement le flacon. Le bouchon est encore traversé par une tige de cuivre qui amène le courant au mercure et de là à la spirale, et par un barreau de fer doux que l'on peut enfoncer plus ou moins dans l'intérieur de l'hélice. Le tout, pour éviter l'échauffement, peut être placé dans un second récipient entièrement rempli d'eau.

Le fonctionnement de cet interrupteur est très simple et ne diffère aucunement de celui de la spirale simple; la présence du barreau de fer doux a pour but de donner une plus grande amplitude aux oscillations, mais n'influe pas sur leur rapidité. Cette amplitude peut atteindre 2 centimètres et plus avec les courants intenses de 15 à 20 ampères qu'exige le fonctionne-

ment des grosses bobines d'induction. La vitesse de l'oscillation de la spirale dépendant du diamètre du fil de cuivre, de sa dimension transversale, du nombre des spires, on trouvera très aisément les dimensions les mieux appropriées pour une bobine d'induction donnée. Comme exemple, je citerai la bobine de Ruhmkorff que possède le cabinet de physique de notre Université, qui marche normalement avec un courant d'une vingtaine d'ampères et donne des étincelles de 20 à 25 centimètres. L'interrupteur rapide que nous y avons adapté a donné des résultats très satisfaisants pour l'illumination des tubes de Rœntgen, expériences de Tesla, etc.; il est formé d'une hélice de 15 spires ayant 24 millimètres de largeur transversale pour un diamètre du fil de $1^{mm},5$ les spires elles-mêmes sont séparées l'une de l'autre par un intervalle de 1 milimètre environ.

Ce petit appareil, que chacun peut construire soi-même en quelques instants, peut être rendu plus pratique en lui adaptant les dispositifs employés dans d'autres interrupteurs, entre autres le commutateur indispensable pour changer le sens du courant, une vis à crémaillère pour établir commodément le contact de l'extrémité du fil de cuivre avec le mercure. D'autre part, il est avantageux de modifier, dans une certaine mesure, la rapidité des oscillations, ce qui se fera en adaptant à l'appareil une pince pour pouvoir à volonté immobiliser un certain nombre de spires, ainsi que le montre la figure qui accompagne cette description (*fig.* 1).

Un second modèle d'interrupteur, représenté par la figure 2, donne une rapidité d'oscillation encore plus grande, mais est d'une construction moins simple que

le précédent. Le fonctionnement en est inverse, c'est-à-dire que la spirale de cuivre est fixe, tandis que la tige de fer doux est libre de se mouvoir dans son intérieur. Afin de donner à ce genre d'interrupteur une plus grande énergie, la spirale devient un électro-aimant véritable. L'une des extrémités de la tige de

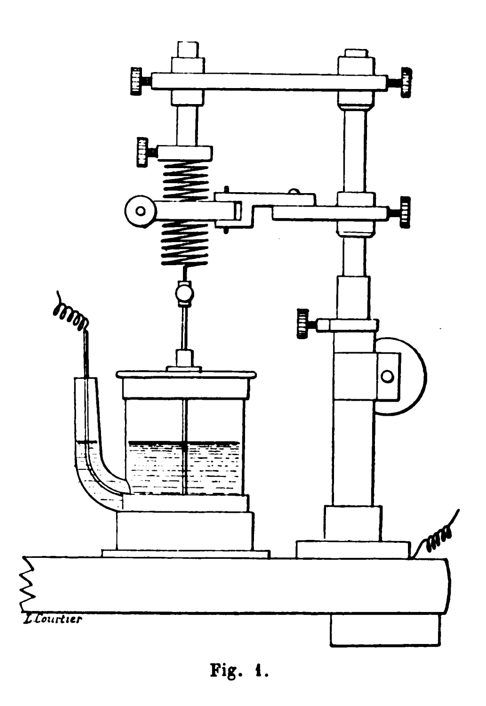


Fig. 1.

fer dépasse la partie inférieure de la bobine, tandis que l'autre extrémité n'en atteint que la partie centrale; le contact avec le mercure est fait au moyen d'une pointe de cuivre ou de platine vissée dans le fer. L'extrémité supérieure du barreau de fer est soudée à une tige de cuivre que l'on contourne en spirale dans la partie qui est située au-dessus de l'hélice magnéti-

sante. Bien que traversée par le courant, cette spirale agit surtout, en vertu de son élasticité, comme ressort antagoniste pour rétablir le contact avec le mercure, lorsque, sous l'action énergique du courant, le barreau est soulevé dans l'intérieur de l'électro-aimant.

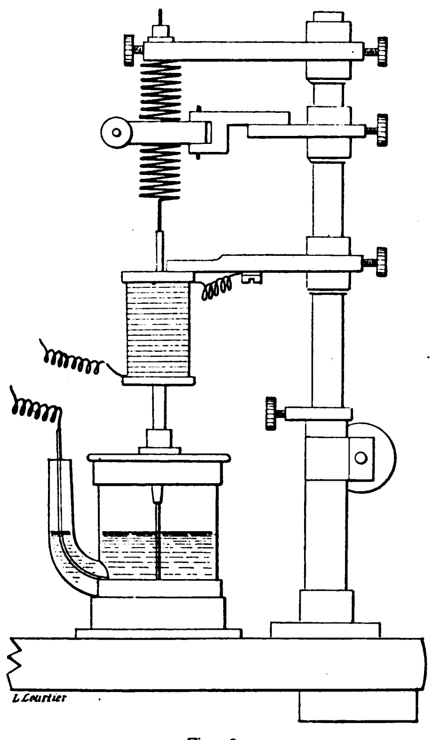


Fig. 2.

Cet interrupteur peut être facilement construit de manière à donner de la rapidité et de l'amplitude aux oscillations; si l'on choisit un fort ressort fait d'une dizaine de tours seulement d'un gros fil de cuivre de 2 à 3 millimètres de diamètre, l'attraction du fer doux

à l'intérieur d'un solénoïde parcouru par des courants intenses agit très énergiquement pour déprimer le ressort qui réagit très vivement à son tour lorsque le courant cesse.

On utilise généralement le platine pour établir les contacts dans les interrupteurs à mercure, cependant on peut sans inconvénient éliminer l'emploi de ce métal coûteux. Comme on le sait, le cuivre ne se dissout pas dans le mercure d'une façon appréciable, il peut donc servir, au même titre que le platine, à produire l'interruption du courant; si ce métal se couvre à la longue d'une couche de vert-de-gris, ce petit défaut est largement compensé par une conductibilité électrique bien supérieure à celle du platine, par l'élimination de soudures avec le fer ou le cuivre ou de contacts défectueux qui s'échauffent.

MARGOT,
Préparateur à l'Université de Genève.

L'Éditeur-Gérant : Vve CH. DUNOD.

37 734. — Imprimerie LAHURE, 9, rue de Fleurus.

ANNALES

TÉLÉGRAPHIQUES



Année 1898. Mai-Juin

SUR LES

EFFETS PHYSIOLOGIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ

INTRODUCTION

Depuis plus de cent ans, les médecins et les physiologistes emploient l'électricité pour exciter les tissus vivants et principalement les nerfs et les muscles. Ces applications ont suivi pas à pas les découvertes des physiciens. On a commencé par employer, comme excitant, la machine statique, puis la bouteille de Leyde. Plus tard, après la découverte de Volta, on donna la préférence à la pile. Enfin, avec Faraday, c'est la bobine d'induction qui prédomina et à laquelle nombre de médecins donnent encore la préférence. Depuis quelques années, j'ai introduit en électrothérapie des méthodes nouvelles : le courant sinusoïdal, le courant ondulatoire, l'auto-conduction et les courants à haute fréquence. Ces nouvelles méthodes

d'électrisation sont mises en pratique aujourd'hui par la plupart des électrothérapeutes. Les effets obtenus sont très différents suivant les modes d'électrisation et les appareils employés. Comment se reconnaître au milieu de ce dédale? Comment faire des mesures? Comment arriver à unifier les méthodes et rendre profitables à tous les observations de chacun? Les médecins croyaient et proclamaient qu'il y avait plusieurs électricités; que l'électricité de la machine statique n'avait rien de commun avec celle de la pile ou de la bobine d'induction. Leur affirmation était fausse en théorie, mais absolument juste en pratique en ce sens que les effets produits sur l'organisme par ces différentes sources électriques sont radicalement différents. Tout ce que l'on savait, même jusqu'au Congrès de 1881, c'est que le courant électrique excite l'organisme, surtout par ses variations bien plus que par son intensité absolue. Il n'y a qu'à relire les discussions que j'ai résumées comme secrétaire, qui eurent lieu à la Commission internationale d'électro-physiologie dans les séances des 22 et 23 septembre 1881, pour voir quelle était l'indétermination de ce problème au moment où j'en abordais l'étude expérimentale.

Quelles sont les lois de l'excitabilité électrique? Dans une variation électrique, quels sont les facteurs qui produisent l'excitation? La cause d'excitation du nerf moteur ou sensitif est-elle la même que celle du muscle? Pourquoi l'électricité amène-t-elle la mort, lors d'une décharge unique du condensateur, ou dans le cas d'un courant alternatif, ou sous l'influence d'un courant continu? Autant de questions restées sans réponse scientifique.

J'ai dû prendre par conséquent le problème *ab ovo* et définir les causes de la mise en activité des tissus dans le cas le plus simple : celui d'une décharge unique d'électricité. J'ai été ainsi amené à étudier la *forme de l'onde électrique* qui traverse le tissu excité et à comparer les variations de l'onde avec les variations de l'excitation provoquée par son passage. C'est ce que j'ai appelé *la caractéristique d'excitation.*

Après avoir étudié l'influence de la forme de l'onde pour une excitation *unique*, j'ai cherché ce que devenaient les phénomènes physiologiques lorsque l'on répétait cette onde unique de plus en plus fréquemment. C'est ainsi que j'ai été amené progressivement à découvrir les effets physiologiques des courants alternatifs de forme sinusoïdale depuis les basses fréquences jusqu'aux fréquences industrielles et enfin jusqu'aux plus hautes fréquences produites par l'ondulateur de Hertz.

Cette étude, commencée en 1878, a été poursuivie sans relâche depuis cette époque comme en témoignent les publications successives dont je donne ci-dessous, en partie, l'indication. Nous commençons seulement à voir clair dans ce problème si intéressant des effets physiologiques de l'électricité, et pourtant la question est capitale. Comme je l'ai dit et répété depuis vingt ans l'avenir est à la médecine physique et de tous les modificateurs de l'organisme, l'électricité est le plus puissant, le plus varié dans ses effets, et le plus facile à doser. Aujourd'hui, grâce à ces études, tous les médecins peuvent définir et mesurer les excitations électriques qu'ils emploient, et je suis grandement récompensé de mes efforts en voyant adoptées par les électrothérapeutes du monde entier les mé-

thodes que j'ai successivement développées et qu'on trouvera résumées dans ce travail.

Ondes électriques. Caractéristiques d'excitation.

(Biologie, 1er avril 1882.)

Cette étude a une importance pratique très grande, puisqu'elle doit servir de base à une branche de la thérapeutique dont l'utilité s'affirme chaque jour davantage, je veux parler de l'*Electrothérapie*.

— L'électricité est, par excellence, l'excitant des tissus vivants. Si nous considérons une excitation *unique*, appliquée au nerf moteur ou au muscle, le résultat sera très différent suivant la source électrique employée. Une pile donnera des effets tout différents de ceux qu'on obtiendra de l'étincelle d'une bouteille de Leyde, ou du courant induit d'une bobine. La même bobine donnera des effets variables suivant la grosseur du fil; et une machine magnéto des effets autres que la bobine d'induction, etc.

Impossible de faire des mesures dans ces conditions et de pouvoir rapporter à une même unité des excitations provenant de sources électriques si différentes. La question se trouvait dans cet état d'indéterminisme lorsque j'en ai abordé l'étude en 1881. Par une série d'expériences poursuivies systématiquement, j'ai montré que les effets de ces diverses sources électriques pouvaient être prévus, mesurés et rapportés à une unité commune par la connaissance de l'*onde électrique* émanant de chacune de ces sources. C'est cette onde électrique que j'ai appelée la *Caractéristique de l'excitation*. Quand cette courbe est la même, les

résultats physiologiques sont les mêmes, quelle que soit la source électrique d'où elle émane.

Cette idée de la *forme de l'onde électrique* est aujourd'hui devenue classique dans toutes les applications de l'électricité à la médecine, grâce à mes publications successives.

Voici comment je suis arrivé à cette notion.

Au point de vue physiologique où nous nous plaçons ici, on peut établir une division fondamentale des effets de l'électricité suivant qu'on emploie *l'état variable* ou *l'état permanent* du courant.

Cette distinction, admise par tous les physiologistes, s'impose également en Électrothérapie et se justifie par l'examen même le plus superficiel. L'état variable, sur un être vivant, se traduit par une excitation très violente des nerfs et des muscles qui entrent en contraction, tandis que rien d'analogue ne se manifeste dans l'état permanent si l'on emploie un courant de force modérée.

Une expérience très élégante de Claude Bernard met bien ce fait en lumière. On place dans le circuit d'une pile une roue interruptrice de Masson, un voltamètre et une grenouille préparée à la Galvani. En laissant la roue immobile on fait passer le courant de la pile à travers les trois appareils à la fois ; le voltamètre dégage des gaz, la patte de grenouille reste immobile. On a les effets du courant permanent. Si l'on vient à mettre la roue de Masson en mouvement, le dégagement gazeux cesse presque complètement dans le voltamètre tandis que la patte de grenouille entre en contraction violente. Le courant qui la traverse est pourtant plus faible que dans le premier cas, mais on a les effets physiologiques dus à l'état va-

riable. Cette simple expérience montre que les effets physiologiques du courant (action sur la sensibilité et la motricité) ne sont nullement sous la dépendance de son intensité absolue.

Si, au contraire, le courant est très fort, on peut avoir des manifestations extérieures durant l'état permanent, mais ces manifestations tiennent uniquement dans ce cas à l'électrolyse interstitielle des tissus et à la décomposition qui a lieu *dans toute leur masse*, ainsi que l'ont bien mis en évidence les expériences de M. Weiss. On peut dire que, dans ces conditions, ce n'est pas l'électricité qui agit, mais bien les produits chimiques libérés par le passage du courant, dans l'intimité même des tissus. On a affaire à un simple excitant chimique engendré par l'électricité sur son passage et dépendant uniquement de l'intensité du courant, conformément aux lois de Faraday.

C'est sur cette action particulière que Ciniselli et surtout le Dr A. Tripier ont fondé une branche importante de l'Électrothérapie ; je veux parler de l'électrolyse ou cautérisation et destruction potentielle des tissus vivants par le courant continu.

Pour doser les effets du courant permanent sur les êtres vivants, nous avons un moyen simple. Puisque son action dépend uniquement de l'intensité, il suffira donc de mesurer cette dernière avec un galvanomètre. Quant à ses effets locaux, aux points d'entrée et de sortie, ils dépendent également de l'intensité par unité de surface, c'est-à-dire de la *densité*. D'après cela, les divers expérimentateurs se mettront dans des conditions physiquement définies en employant des galvanomètres gradués en unités absolues ; leur

adoption est devenue générale depuis le Congrès de 1881 sur la proposition que j'en ai faite avec M. Marey à la Commission internationale d'électrophysiologie (*). Les observations médicales y ont gagné en précision et en unité.

Si nous savons à quelles conditions physiques rapporter les effets physiologiques de l'état permanent, si nous pouvons surtout aisément les mesurer, il n'en est pas de même pour l'état variable. Par quel facteur devrons-nous définir la puissance physiologique d'une excitation électrique ? Cette importante question a été agitée en 1881 au Congrès d'électrophysiologie, mais ne put donner lieu alors qu'à un échange de vues plus ou moins hypothétiques : la base expérimentale manquait. C'est depuis cette époque que j'entrepris une série d'expériences systématiques sur ce sujet qui intéresse non seulement la physiologie, mais qui doit servir de base à l'électrothérapie.

Au *point de vue physiologique*, une excitation électrique produite par l'état variable ne peut être définie par les données servant de mesure à l'état permanent. Pour en faire une analyse complète, il faut connaître *tous* les éléments à *chaque instant de la variation*. Cela revient à dire qu'il faut avoir la courbe complète de la variation, c'est-à-dire la *forme physique de l'onde électrique* d'excitation. C'est cette courbe particulière à chaque excitation électrique que j'ai appelée : *la caractéristique de l'excitation*. Mais, pour tracer cette courbe en fonction du temps, quelle variable devrons-nous prendre ? *A priori*, ce ne peut

(*) Voir d'Arsonval, Compte rendu de la Commission d'électrophysiologie, *Revue scientifique*, et Rapport de M. du Bois-Reymond, même recueil, 1881.

être l'intensité, en vertu même de l'expérience de Claude Bernard relatée plus haut. Il est facile, d'autre part, de montrer que c'est la variation du potentiel *au point excité* qui est le facteur important dans l'excitation du système nerveux. Prenons un nerf moteur relié à une masse musculaire dont nous pourrons enregistrer les mouvements à l'aide du myographe. Excitons ce nerf *en un point quelconque de sa longueur* au moyen du pôle *négatif* d'une pile thermo-électrique dont le pôle *positif* sera relié à la masse musculaire (excitation unipolaire de Chauveau). La contraction du muscle restera sensiblement la même *quel que soit le point du nerf que l'on excite*. A cause de l'énorme résistance du nerf (10 à 25 000 ohms pour le nerf sciatique de la grenouille) comparée à celle de la pile qui est négligeable, le potentiel aux points excités successivement sera resté constant, mais l'intensité du courant traversant le nerf, à chaque contact, aura varié dans d'énormes proportions. On peut faire l'expérience inverse, c'est-à-dire exciter le nerf à *intensité constante* en faisant varier la force électromotrice de la pile proportionnellement à la longueur du nerf intercalé. Dans ce cas, l'énergie de la contraction musculaire augmente avec le potentiel au lieu de rester constante comme l'intensité. Ces deux expériences qui se complètent et se contrôlent mutuellement montrent d'une manière très nette que, pour tracer la caractéristique d'excitation, il faut prendre $e = f(t)$ et non pas $i = f(t)$.

Au début de mes expériences (octobre 1881), je cherchai à tracer l'onde électrique provenant des électromoteurs généralement employés en physiologie. Je rencontrai des difficultés insurmontables et je re-

nonçai très vite à procéder par *analyse* pour opérer au contraire par *synthèse*.

Pour réaliser la synthèse d'une onde électrique de forme quelconque, j'imaginai la méthode suivante (*) qui me donna pleine satisfaction ; le schéma ci-joint est destiné à faciliter l'intelligence de la description, mais il ne doit être considéré que comme un simple dessin schématique donnant le principe de la méthode (*fig.* 1). Soit P une source constante d'électricité

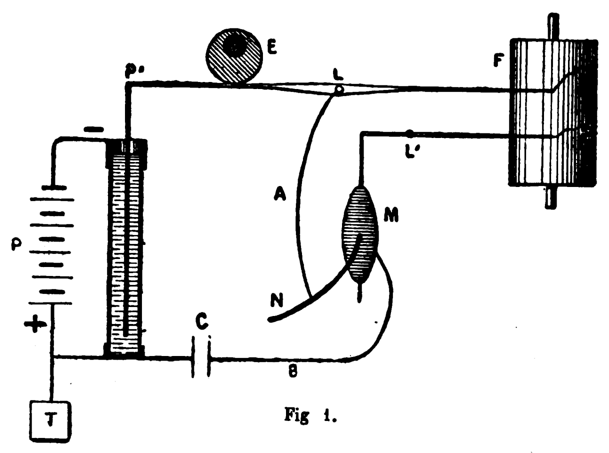


Fig 1.

(accumulateurs) dont le circuit est fermé au travers d'une colonne liquide de sulfate de cuivre en solution saturée contenue dans un tube de verre. Le courant entre par le bas et ressort par le haut au moyen de contacts en cuivre rouge. L'autre pôle est mis à la terre et se trouve au potentiel zéro. La partie supérieure de la colonne liquide est, au contraire, à un potentiel négatif de 2, 3 ou 10 volts à volonté. Le potentiel décroît régulièrement le long du tube d'après

(*) Voir *Comptes rendus de la Société de Biologie*, 1er avril 1882.

une loi bien connue. Supposons qu'un fil métallique P′ en cuivre, isolé jusqu'à sa pointe inférieure, puisse monter et descendre le long de la colonne. Si nous supposons la pointe au fond du tube, le potentiel est zéro; mais, en relevant le fil, son potentiel va croître régulièrement. Attachons rigidement ce fil à l'extrémité d'un levier mobile autour du point L, l'autre extrémité se déplaçant le long d'un cylindre enfumé F. Il est facile de voir que les déplacements de la pointe du levier L sur le cylindre F inscriront les phases et les grandeurs de la variation du potentiel du fil plongeur P′. Pour avoir une courbe déterminée d'avance, je fais osciller le levier L par la rotation d'un excentrique E, dont on taille le profil en conséquence. En pratique, j'attache le fil P′ soit à une tige vibrante, soit à une pendule qui donne une variation sinusoïdale du potentiel. J'obtiens toute autre forme et toute vitesse en attachant ce fil à un ressort plus ou moins tendu (fil de caoutchouc) que je déclanche mécaniquement pour produire l'excitation. Si le fil A′ était mis simplement en rapport avec le nerf N communiquant à la terre, cet organe serait parcouru par un courant continu qui en modifierait l'excitabilité. J'évite cet inconvénient en faisant passer le courant dans le primaire d'une bobine d'induction ou bien en intercalant un condensateur étalonné en C. Le muscle M, excité par le nerf N, est attaché au levier myographique L′, qui trace la courbe de la contraction musculaire au-dessous de la caractéristique d'excitation, tracée par le levier L. Dans la méthode unipolaire, le pôle négatif de la pile correspond au plongeur et le pôle positif est à la masse musculaire, à la façon habituelle. De cette manière, le levier L enregistre

exactement les variations du potentiel au point excité et le nerf ne peut se polariser (*).

Ces expériences m'ont amené à formuler la loi suivante : *L'intensité de la réaction motrice ou sensitive est proportionnelle à la variation du potentiel au point excité* (**).

La conséquence pratique de toutes ces expériences, dont je ne peux indiquer ici que la conclusion générale, est que pour définir l'action physiologique et thérapeutique d'un appareil électro-médical quelconque, à courant interrompu, il faut connaître, en fonction du temps, la loi de variation de la force électromotrice *aux points d'application des électrodes* sur le sujet. Voici un appareil que j'ai imaginé dans ce but.

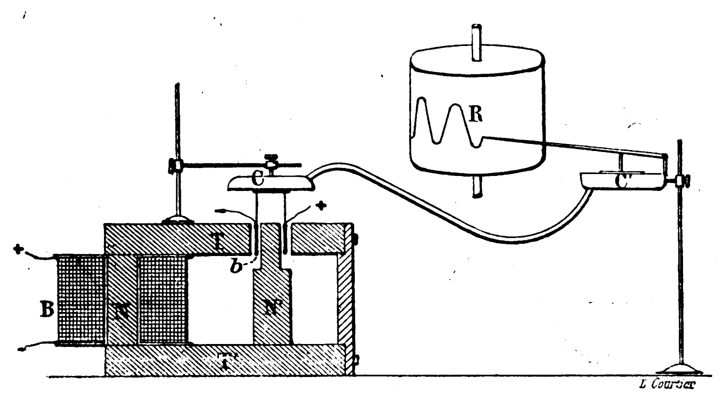


Fig. 2.

Il permet de tracer automatiquement cette courbe en employant comme source d'électricité un appareil

(*) On obtient une *onde alternative* en reliant le levier L *au milieu* de la pile P et en faisant les communications convenables.

(**) Voir d'Arsonval, *Société de Biologie*, 1er avril 1882; — *Société de Physique*, 1885 et 1891; — *Lumière électrique*, 1887; — *Archives de Physiologie*, 1889; — *Académie des Sciences*, 1891; — *Société française d'électrothérapie*, 1891.

médical magnéto-faradique quelconque à faible fréquence. Il est fondé sur le même principe que le galvanomètre à circuit mobile que j'ai fait connaître en 1881, avec M. Marcel Deprez. Il se compose d'un puissant aimant (ou électro-aimant) TT′ NN′ créant un champ magnétique annulaire comme dans mon téléphone. Dans ce champ peut osciller une légère bobine *b* parcourue par l'onde électrique dont on veut inscrire la forme. En vertu d'une action bien connue, cette

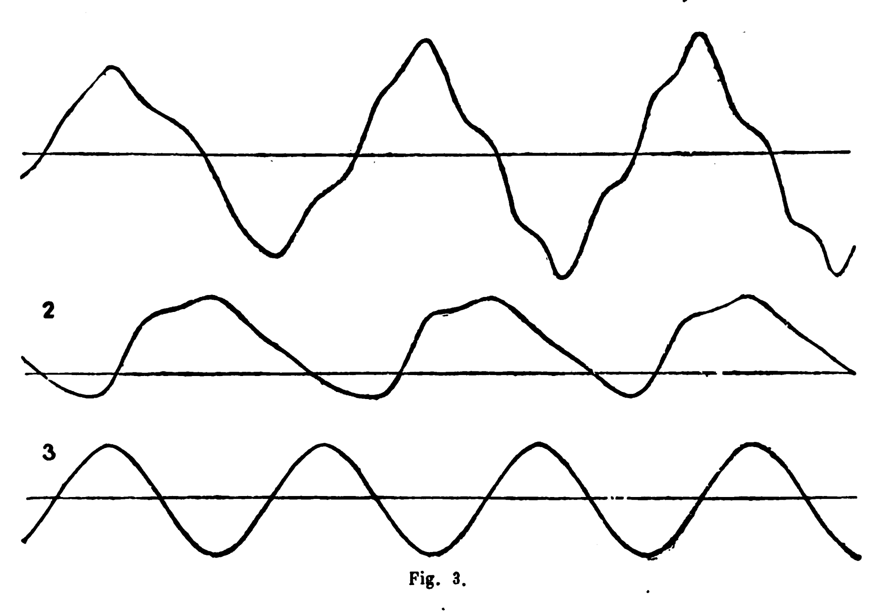


Fig. 3.

bobine se déplacera dans le champ et son déplacement mesurera à chaque instant les variations du courant qui la traverse. Pour inscrire à distance ce déplacement et l'amplifier en même temps, la bobine est suspendue à la membrane de caoutchouc d'un tambour de Marey *c*. Ce premier tambour est relié à un second tambour amplificateur plus petit *c′* portant un levier

inscripteur se déplaçant sur un cylindre enfumé R, mû par un mouvement d'horlogerie.

L'instrument constitue un galvanomètre très sensible inscrivant à distance par le mécanisme bien connu des tambours à air de Marey employés en physiologie. On obtient ainsi automatiquement la courbe de l'onde électrique émanant de l'électromoteur employé et l'on peut comparer facilement entre elles les différentes machines. Voici, à titre d'exemple, trois courbes provenant de trois appareils différents (*fig.* 3): La première provient d'une petite machine magnéto, genre Clarke (modèle médical de Gaiffe), à courants

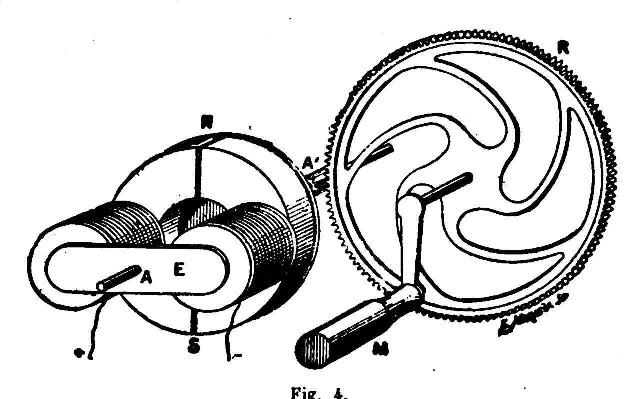


Fig. 4.

non redressés. On voit que la variation n'est pas uniforme. La seconde provient d'une machine analogue, mais à courants redressés (on voit qu'ils le sont incomplètement). Enfin, la troisième courbe (qui est très régulière) provient d'une petite machine médicale que j'ai imaginée pour avoir un courant dont la variation soit sinusoïdale. C'est une machine, genre Pixii, modifiée de la façon suivante (*fig.* 4). Un aimant circulaire NS se meut devant un électro-aimant fixe E,

autour d'un axe AA′ commandé par la roue dentée R et la manivelle M. On recueille ainsi aux fils marqués + et — le courant représenté par la courbe 3 de la figure 13. Ce courant, à variations régulières, jouit de propriétés précieuses, comme je le dirai tout à l'heure. Il a l'avantage de ne donner aucun choc brusque, d'amener graduellement le tétanos du muscle (suivant la rapidité de la rotation) sans douleur, et son passage ne s'accompagne d'aucun phénomène d'électrolyse. Dans cette forme de courant alternatif, tout est connu; on peut opérer toujours dans les mêmes conditions, contrairement à ce qui a lieu avec les appareils d'induction à trembleur, dont les effets varient non seulement de l'un à l'autre, mais aussi pour le même appareil suivant les caprices de l'interrupteur et de la pile qui le met en vibration.

Voltaïsation sinusoïdale.

Au point de vue de la pratique médicale, j'ai été conduit à étudier tout spécialement les excitations électriques produites par les courants alternatifs à variation sinusoïdale.

Dans ce cas, l'onde électrique qui constitue la *caractéristique d'excitation* est définie par deux facteurs : 1° la fréquence (ligne AB de la figure 5), et 2° l'ordonnée maxima (ligne EP) qui représente pour nous le facteur physiologique le plus important, c'est-à-dire la variation maxima du potentiel. Une *période* complète est caractérisée par la double courbe comprise entre A et C. On voit que le courant varie régulièrement. Il part de zéro pour atteindre un maximum *positif* en E′, revient graduellement à zéro en B pour

croître dans le sens *négatif* jusqu'en E′, et revenir à zéro en C, et ainsi de suite. Les quantités d'électricité traversant les tissus étant égales et de signe contraire, aucun phénomène ni d'électrolyse ni de polarisation n'est possible. Les effets *secondaires* dus au

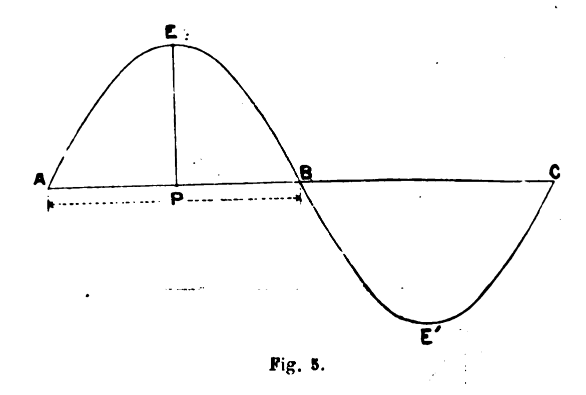


Fig. 5.

passage du courant se trouvent éliminés et il reste seulement l'action propre à l'électricité elle-même. On voit que la *fréquence*, c'est-à-dire le nombre d'excitations par seconde (ligne AB), est le double du nombre de *périodes* (ligne AC), pendant le même temps.

Dans la pratique médicale, il est essentiel de pouvoir faire varier d'une manière indépendante la valeur des facteurs AB et EP, et il est non moins essentiel d'avoir, à chaque instant, la valeur de ces variations.

Le schéma ci-dessous (*fig.* 6) montre la machine que j'ai fait construire à Gaiffe pour résoudre ce problème d'une manière pratique.

Soit CC′ un anneau Gramme portant d'un côté de l'axe le collecteur ordinaire avec ses balais B, B′ et de l'autre côté deux bagues métalliques isolées, communiquant respectivement avec chaque moitié de l'an-

neau par deux prises de courant situées sur l'induit à 180 degrés. L'anneau tourne dans un champ magnétique créé par un courant indépendant traversant l'in-

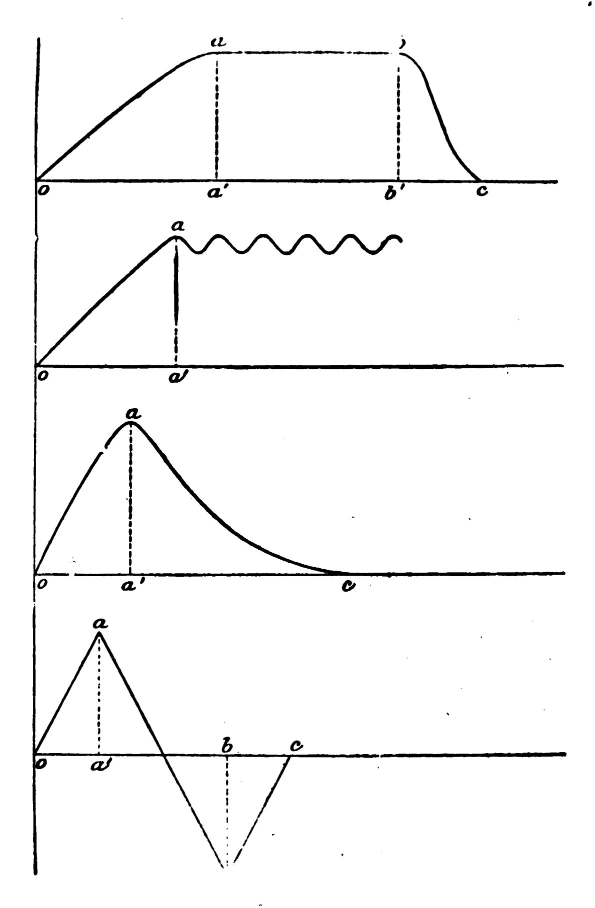


Fig. 5 *bis*. — Diverses caractéristiques d'excitation.

ducteur I par les fils marqués + et —. Si l'on met l'anneau en mouvement par une force mécanique extérieure, on recueillera aux balais B, B' un courant con-

tinu et aux frotteurs K, K′ un courant alternatif à variations sinusoïdales.

En plaçant sur l'axe de la machine un indicateur de vitesse, on connaît à chaque instant la fréquence du courant. Quant à la force électromotrice maxima, elle est donnée tout aussi simplement et d'une manière continue par un voltmètre ordinaire à courant continu relié aux deux balais B, B′.

On fait varier la fréquence en changeant la vitesse de rotation, et la force électromotrice en modifiant le champ magnétique créé par l'électro-aimant. Le voltmètre donne aussitôt la valeur de l'ordonnée maxima et l'indicateur de vitesse, la fréquence. L'indicateur

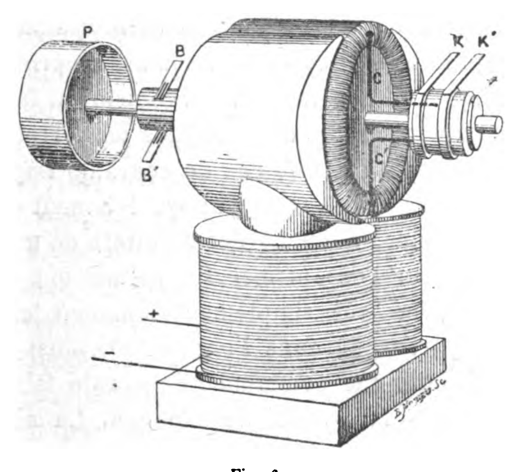


Fig. 6

de vitesse est basé sur le régulateur décrit figure 23. Les deux éléments de la sinusoïde sont donc connus à chaque instant et l'opérateur leur donne la valeur qu'il désire. Je ferai remarquer qu'en amenant un courant continu, provenant d'une pile, par exemple, aux

balais B, B′, on recueillera en KK′ un courant sinusoïdal. En mettant BB′ en communication avec un réseau à 110 volts continus, et en intercalant un rhéostat convenable, on recueillera en KK′ des courants sinusoïdaux dont le voltage pourra varier de 110 à 20 volts, par exemple, et avoir ainsi une installation très simple.

Si, au lieu de partager l'anneau en deux parties égales CC′, on le partage en trois, ou plus généralement en N parties égales, aboutissant à autant de frotteurs, on aura des courants *polyphasés*. Ces courants polyphasés sont des courants sinusoïdaux simples qui se succèdent régulièrement durant le cours d'une révolution de l'anneau de manière à être en retard les uns sur les autres, on dit qu'ils sont *décalés* d'un angle qui varie précisément suivant le nombre de prises CC′. Pour appliquer ces courants à l'organisme il faut autant de tampons qu'il y a de bagues KK′. Trois tampons par exemple dans le cas de courants *triphasés*. Les courants *triphasés*, que j'ai spécialement étudiés l'automne dernier, donnent des résultats de massage très curieux sur l'organisme. Ils permettent également de trouver très simplement comment les courants se répartissent dans l'organisme, ainsi que je l'ai montré dans une communication orale faite l'année dernière à la Société de biologie. La machine décrite plus haut permet d'obtenir ce genre de courants et de les doser tout aussi simplement que le courant sinusoïdal simple.

La voltaïsation sinusoïdale est pratiquée aujourd'hui par nombre d'électrothérapeutes pour les cas les plus variés. M. le D[r] Apostoli poursuit des recherches plus spécialement au point de vue des applications

gynécologiques. Il a obtenu des résultats intéressants qu'il a signalés l'an dernier au congrès de Bruxelles dans un travail dont je reproduis ci-dessous les conclusions :

« Le courant alternatif sinusoïdal que M. d'Arsonval a introduit dans l'électrothérapie est utilisable en gynécologie, et voici les résultats généraux et sommaires de cette nouvelle acquisition :

En cinq mois, de mars à août 1892, 34 malades de la clinique du Dr Apostoli, comprenant 12 fibromes et 22 affections des annexes, ont été traitées par le courant alternatif. Elles ont été soignées avec le concours et l'assistance des Drs Grand et Lamarque, et au total 320 séances ont été faites.

Toutes ces malades ont été soumises à une application uniforme, un pôle dans l'utérus sous la forme d'hystéromètre, et l'autre sur le ventre par une large plaque de terre glaise. La durée de chaque séance était de cinq minutes; elles ont été renouvelées de deux à trois fois par semaine.

La vitesse seule des alternances a varié suivant les circonstances, ou mieux la sensibilité des malades, pour osciller entre une moyenne de 4 à 6000, et un maximum de 11 à 12000 par minute.

L'appareil qu'on a utilisé est le premier modèle construit par Gaiffe, qui n'est autre qu'une machine magnéto-faradique de Clark, modifiée et transformée par d'Arsonval, donnant à grande vitesse une différence maxima de potentiel de 64 volts et à vitesse moyenne, une différence de 32 volts. Cet appareil est actionné par la pédale d'une machine à coudre.

Toutes les 34 malades ont été scrupuleusement observées, et voici les conclusions générales que l'on

peut dégager de cette période initiale de traitement, conclusions qui toutefois ne paraissent pas encore définitives, au Dr Apostoli, en raison de l'outillage imparfait et de la durée relativement restreinte de l'expérimentation :

1° Le courant alternatif *sinusoïdal* appliqué dans la cavité intra-utérine, et dans les conditions opératoires où le Dr Apostoli s'est placé, est toujours inoffensif et bien supporté ;

2° Son application n'est suivie d'aucune réaction douloureuse, ou fébrile, et s'accompagne le plus souvent au contraire d'une sédation manifeste ;

3° Il ne paraît pas avoir d'action marquée sur le symptôme *hémorragie* et aurait plutôt une tendance à provoquer quelquefois sa continuité ;

4° Il exerce une action très nette sur le symptôme *douleur;* cette action s'affirme dès les premières séances et le plus souvent immédiatement dès la fin de la séance ;

5° Il combat très avantageusement, mais non constamment toutefois, la *leucorrhée* qui, le plus souvent, diminue ou disparaît ;

6° Il n'a pas d'action appréciable sur l'*hydrorrhée* liée à certains fibromes ;

7° Son influence sur la régression anatomique des fibromes n'est pas encore nettement établie ;

8° Il active et favorise la résolution des *exsudats péri-utérins*.

En résumé, ce traitement, tout récent qu'il soit, et tout incomplet qu'il paraisse encore, a toutefois donné une réponse assez nette pour qu'il soit permis de le considérer comme une heureuse conquête de la thérapeutique gynécologique. Des recherches complémen-

taires permettront de préciser et de fixer dans un avenir prochain les conditions opératoires les meilleures pour combattre des états pathologiques différents (hypertrophiques, infectieux ou phlegmasiques), et il y aura lieu de faire varier dans tel ou tel cas le *nombre*, *la durée*, *le rapprochement des séances*, et d'étudier les différences curatives qui résulteront des variations qu'on pourra imprimer au *voltage* et à l'*intensité* du courant, ainsi qu'à la rapidité des alternances.

Les résultats acquis prouvent que le courant alternatif sinusoïdal doit prendre sa place en gynécologie à côté, *mais non encore au-dessus*, du courant faradique et galvanique.

Il est destiné à leur servir, soit d'auxiliaire actif en les complétant, soit à les suppléer et à remplir des indications personnelles et nouvelles que l'avenir établira avec plus de netteté.

C'est jusqu'à présent le médicament par excellence de la *douleur*, et, comme tel, s'il ne saurait pas faire table rase des applications faradiques et galvaniques qui ont fait leur preuve, c'est toutefois une arme de plus, et la *gynécologie conservatrice* ne peut qu'accepter tout ce qui tend à élargir et à fortifier son domaine. »

Je signalerai également une thèse pour le doctorat en médecine que vient de passer récemment à la Faculté de médecine de Paris Mme Kaplan-Lapina, où le même sujet est traité avec détails et où l'auteur arrive aux mêmes conclusions. Quant à l'action spéciale sur les échanges nutritifs, MM. Gautier et Larat ont donné des observations cliniques qui confirment mes expériences sur les animaux. Ce sujet a d'ailleurs besoin, en ce qui concerne l'homme malade, d'être traité avec

toute l'exactitude que comporte le nouveau procédé de dosage que je viens de signaler. L'observation clinique doit être tout aussi rigoureuse si l'on veut savoir exactement ce que l'on est en droit d'attendre de cette modalité particulière de l'énergie électrique dans les maladies par viciation de la nutrition. C'est un point sur lequel nous ne tarderons pas à être fixés, M. le professeur Bouchard ayant bien voulu s'associer à moi pour élucider cette question.

La mort par l'électricité.

J'arrive maintenant aux expériences que j'ai instituées pour comparer les effets sur la nutrition (effets trophiques) des divers modes d'électrisation (*).

« Pour constater ces effets, je me suis adressé à des phénomènes objectifs, facilement mesurables. J'ai mesuré, d'une part, les variations d'absorption de l'oxygène et de production de l'acide carbonique, et, d'autre part, les variations dans la *production* de la chaleur (calorimétrie animale) au moyen de procédés spéciaux que j'ai fait connaître antérieurement (voir *Société de Biologie*, 1877).

« J'ai étudié successivement l'action trophique : 1° du bain statique ; 2° de la faradisation générale ; 3° du courant continu ; 4° du courant alternatif sinusoïdal.

« 1° Pour le bain statique, je ferai remarquer d'abord que cette dénomination est impropre. L'électri-

(*) Voir d'Arsonval, *Cours de Médecine du Collège de France, Applications médicales de l'Électricité.* 1889-1890 et 1890-1891 ; — *Société de Biologie*, 24 février 1891 ; — *Société française d'électrothérapie*, mai-juin 1891.

cité n'est nullement à l'état statique ou de repos, chez un sujet placé sur le tabouret isolant et en communication avec une machine en fonction. Le corps du sujet est parcouru par un courant constant, à très haut potentiel, qui s'échappe de lui à travers l'air comme circuit extérieur. L'intensité de ce courant, quoique faible, n'est nullement négligeable, comme le prouvent les nombres suivants tirés d'une de mes expériences. Le sujet placé sur le tabouret était à un potentiel négatif d'environ 30 000 volts et était traversé par un courant continu de $\frac{1}{25000}$ à $\frac{1}{40000}$ d'ampère venant de la machine (Holtz à 4 plateaux).

« Le terme de *franklinisation* qu'on a déjà proposé pour ce genre d'électrisation me paraît préférable, car il ne préjuge rien.

« Mes expériences ont porté sur l'homme et sur les animaux. Sous l'influence de la franklinisation, il y a constamment une légère augmentation des combustions respiratoires, et cela en dehors de l'action de l'ozone, car on n'obtient rien de semblable en plaçant le sujet dans le voisinage de la machine, mais sans le mettre en rapport avec elle.

« Lorsque les animaux sont enfermés dans une atmosphère chargée d'air électrisé, les échanges respiratoires sont, au contraire, abaissés, ce qui tient, comme je l'ai indiqué en 1891 à la *Société de Biologie*, à la production de produits nitreux par l'effluve ; produits qui diminuent rapidement la capacité respiratoire du sang, ainsi que me l'ont montré les analyses par la pompe à mercure.

« 2° Les courants faradiques généralisés amènent une contraction plus ou moins violente de tout le système musculaire. Il y a alors exagération des com-

bustions, mais cela tient uniquement au fonctionnement du muscle. On peut arriver, en effet, par ce procédé à produire un véritable tétanos électrique qui amène la mort de l'animal par hyperthermie, ainsi que l'a montré Charles Richet notamment.

« La faradisation généralisée très légère, ne s'accompagnant pas de tétanos, ni de contraction musculaire apparente, peut néanmoins modifier les échanges nutritifs et augmenter la production de chaleur, ainsi que je l'ai montré sur le muscle isolé (*Société de Biologie*, 1887). Les bains par faradisation généralisée légère, proposés par Tripier, peuvent donc être considérés comme un moyen d'augmenter les combustions respiratoires par excitation à la fois du système musculaire et du système nerveux sensitif.

« 3° A mon grand étonnement, le courant continu auquel on prête des effets trophiques spéciaux ne m'a rien donné ni sur l'homme ni sur les animaux. Je suis donc fondé à dire que ses effets trophiques *immédiats* sont nuls. Des analyses faites vingt-quatre et quarante-huit heures après la voltaïsation ne m'ont pas donné de résultats plus saillants au point de vue des combustions respiratoires. Si le courant continu n'agit pas pour modifier les échanges respiratoires, peut-être augmente-t-il les sécrétions cellulaires qui jouent un grand rôle dans l'organisme, comme viennent de le montrer nos expériences avec M. Brown-Séquard. C'est une hypothèse récente de Tripier qui mérite examen.

« 4° Les résultats les plus frappants m'ont été donnés par le courant sinusoïdal, courant figuré par la courbe 3 de la figure 3. Sous son influence, on peut augmenter instantanément de plus d'un quart les

échanges gazeux respiratoires, *et cela en dehors de toute contraction musculaire* et en l'absence de phénomènes douloureux. J'ai obtenu les mêmes résultats sur les animaux et sur l'homme. Ces recherches, que j'ai fait connaître, en 1890, dans mes Leçons du Collège de France, et, en 1891, à la *Biologie* et à la *Société d'Electrothérapie*, ont engagé nombre d'électrothérapeutes à essayer la *voltaïsation sinusoïdale* en thérapeutique. Parmi eux, je peux citer MM. Tripier, Gautier, Larat, etc. MM. Gautier et Larat ont obtenu des effets thérapeutiques intéressants que j'ai communiqués à l'Académie de Médecine et à la Société de Biologie.

« Je suis amené tout naturellement à présent à parler des dangers présentés par les courants alternatifs industriels, du mécanisme physiologique par lequel ils entraînent la mort et des moyens de remédier aux accidents qu'ils provoquent. J'ai déjà publié une partie des expériences que je vais rapporter (*), mais je les ai complétées plus récemment. J'ai essayé comparativement un alternateur Gramme et un alternateur Siemens. A voltage égal, ce dernier est plus dangereux. En faisant passer le courant de la tête à la queue sur un animal, une différence de potentiel de 300 volts alternatifs amène généralement la mort chez le lapin et le chien quand l'intensité atteint 1 ampère environ avec l'alternateur Siemens; il n'en est pas de même avec l'alternateur Gramme. Cette différence est facile à expliquer d'après ce que nous avons vu plus haut. L'onde électrique de l'alternateur Siemens, dont l'induit ne

(*) *Société de Biologie* et *Académie des Sciences*, 4 avril 1887.

contient pas de fer, est en effet beaucoup plus brusque, plus brutale, pourrait-on dire, que celle de l'alternateur Gramme. De là ses effets physiologiques plus accentués pendant la fermeture du courant. Il en est tout autrement à la rupture. Si l'on abandonne l'animal à lui-même après ce choc électrique, l'arrêt de la respiration persiste généralement et la mort est définitive. Cette mort pourtant n'est qu'*apparente*, car, si l'on pratique immédiatement la respiration artificielle à l'aide d'un soufflet et d'une canule introduite dans la trachée, l'animal revient à la vie au bout d'un temps variable, en présentant parfois des paralysies partielles qui disparaissent spontanément. Si l'on pratique la respiration artificielle au moment même où l'on applique le courant, l'animal manifeste de la douleur, mais sans perte de connaissance : on ne peut le tuer alors par ce même courant qui amenait précédemment la mort. Il y a pourtant une limite qui est atteinte lorsque le passage du courant, en produisant le tétanos de tous les muscles du corps, a amené un échauffement portant la température centrale au-dessus de 45 degrés. L'animal meurt alors parce que la chaleur coagule les fibres musculaires du cœur, comme l'a montré Claude Bernard. La preuve en est qu'on peut continuer l'électrisation à la condition de refroidir artificiellement l'animal.

« L'échauffement considérable du corps dans l'électrisation n'est nullement due, comme on le croit, à la résistance du corps s'échauffant comme un conducteur conformément à la loi de Joule. Dans la dernière électrocution faite en Amérique, par exemple, la température du supplicié a été trouvée de beaucoup au-dessus de la normale après la mort. On avait fait passer un

courant de 3 ampères pendant cinquante secondes sous 15000 volts, soit 4500 watts ou environ 1 calorie par seconde. L'échauffement de ce fait n'eût pas donné plus de 50 calories à 60 calories pendant les cinquante secondes, ce qui, pour un homme du poids moyen de 75 kilogrammes, n'eût pas élevé sa température propre de 1 degré centigrade. La chaleur excessive amenée par l'électrisation est donc due uniquement à la contraction violente de tous les muscles. Cette chaleur excessive amène rapidement la coagulation de la fibre musculaire et la rigidité cadavérique par un phénomène semblable à celui qu'on observe chez les animaux forcés à la course ou fourbus, phénomène bien connu des chasseurs. La mort par le courant alternatif est donc due, d'une part, à l'arrêt du cœur et de la respiration qui produit l'asphyxie et, d'autre part, à l'élévation de température due à la fois à l'asphyxie, comme l'a montré M. Brown-Séquard, et à la contraction violente et généralisée du système musculaire due à l'état variable du courant. Je ne saurais trop insister sur ce fait expérimental que les courants alternatifs industriels peuvent n'amener le plus souvent qu'une mort *apparente*, le retour à la vie étant généralement possible si la respiration artificielle est pratiquée *immédiatement*. Un *foudroyé* doit donc être traité exactement comme un *noyé*. Quand le choc électrique a été de courte durée (ce qui est généralement le cas), c'est l'arrêt de la respiration qui amène la mort comme dans la submersion : les contractions musculaires ont été alors de trop courte durée pour amener la coagulation des muscles par l'échauffement.

« Ces expériences vous montrent que l'électrocu-

tion ne constitue nullement un progrès sur la décapitation. L'électrocution a l'avantage, disent ses partisans, d'éviter l'effusion du sang. C'est très vrai, c'est un avantage, oui, mais pour l'exécuteur et les témoins seulement. Quant au supplicié, rien ne prouve qu'il perde la conscience au moment où l'on établit le courant homicide. L'animal électrisé la conserve, comme je l'ai dit plus haut, si l'on pratique la respiration artificielle en même temps ; et, quand l'exécution est faite, la mort n'est peut-être qu'apparente ; qu'est-ce qui prouve que la respiration artificielle ne ramènerait pas le supplicié à la vie? Oserait-on la pratiquer ? Les médecins américains ont raison de faire immédiatement l'autopsie, c'est plus prudent. Avec l'électrocution, qu'est-ce qui empêche d'autre part de simuler une exécution ? Les philantrophes de l'état de New-York ont trouvé notre guillotine barbare ; elle a au moins l'avantage de supprimer brusquement le moi en touchant le nœud vital, et, jusqu'à présent, comme le disait Loye, « le public n'a pas idée que nous puis-« sions simuler une exécution en rappelant, après « coup, le supplicié à la vie ».

« Que deviennent les effets physiologiques de l'état variable en augmentant de plus en plus la rapidité des variations ? Cette question se présentait tout naturellement à moi en poursuivant les expériences systématiques dont je viens de vous rendre compte sur les effets physiologiques de l'état variable. J'essayai de résoudre le problème en actionnant des bobines d'induction au moyen d'interrupteurs mécaniques variés ; mais, lorsque les interruptions devenaient trop rapides, je n'avais plus de courant, comme l'avaient constaté avant moi tous les physiologistes. Je fis construire

alors un petit alternateur sur le modèle breveté par Gramme en 1871 et retrouvé après lui par Mordey. J'employai également une roue phonique de Sieur, et je pus arriver ainsi à avoir 10 000 excitations par seconde. Enfin, en 1890, je songeai à employer le résonateur de Hertz capable de fournir des fréquences que je n'avais jamais osé rêver. Je vis alors que les nerfs et les muscles étaient complètement inexcitables par les étincelles provenant de cet appareil. M. Joubert me dit de son côté avoir été très étonné de n'avoir pu se servir de la grenouille comme galvanoscope. En analysant ce phénomène, je remarquai que les nerfs traversés par ces courants éprouvaient une diminution très notable de leur excitabilité aux courants ordinaires et ne la recouvraient qu'au bout d'un temps assez long. J'exposai ces résultats dans mon cours du Collège de France en décembre 1890. J'en parlai à la Société de Biologie dans des communications orales et dans des communications écrites le 25 avril et 2 mai 1891, en émettant des hypothèses pour expliquer ces faits inattendus. Puis vint l'importante communication de M. Tesla, faite à New-York le 23 mai 1891. Cet habile expérimentateur arrivait incidemment pour les effets physiologiques à des conclusions identiques aux miennes, mais en mettant en œuvre des moyens incomparablement plus puissants. Je demande la permission de mettre sous les yeux du lecteur, à titre de document historique, un extrait de ma communication du 25 avril 1891 à la Société de Biologie.

« Dans une Communication verbale du 24 février 1891, j'ai signalé à la Société l'action physiologique

spéciale des courants alternatifs de forme sinusoïdale à période très lente. J'ai montré que des courants de cette nature, incapables de provoquer aucune contraction musculaire ni aucun phénomène douloureux, agissent néanmoins puissamment sur les combustions respiratoires. Leur passage chez l'homme sain s'accompagne d'une augmentation de la quantité d'oxygène absorbé et d'une émission plus grande d'acide carbonique.

« J'ai poursuivi l'étude de ces courants en augmentant de plus en plus leur fréquence et en étudiant cette fois l'influence de la fréquence sur la sensibilité générale et sur l'excitabilité neuro-musculaire. J'ai employé pour cela des machines industrielles à courants alternatifs Gramme et Siemens, et aussi un modèle spécial d'alternateur pouvant donner jusqu'à 10000 alternances ou excitations par seconde. Par un dispositif que je ne peux indiquer ici, je me suis arrangé de façon que le travail absorbé, sous forme d'énergie électrique, par l'organisme, ou le tissu en expérience, restât constant dans tous les cas, malgré l'augmentation du nombre des alternances. Il suffit pour cela que la formule représentant le travail d'un courant alternatif dans le circuit extérieur satisfasse à l'égalité

$$E_e I_e \cos 2\pi\varphi = \text{const.};$$

E_e étant la force électromotrice efficace, I_e l'intensité efficace du courant et φ ce qu'on appelle la *phase*.

« Pour graduer convenablement le courant qui sert à exciter le nerf ou le muscle, j'envoie le courant provenant de la machine dans le circuit primaire d'un appareil à chariot *sans fer*, et c'est à l'aide du cou-

rant prenant naissance dans la bobine mobile que j'excite le tissu, en éloignant convenablement cette dernière du circuit inducteur. Le chariot de Du Boys-Reymond joue le rôle de transformateur à rendement variable.

« J'ai constaté, dans ces conditions, qu'en augmentant graduellement la fréquence, les phénomènes d'excitation neuro-musculaire vont en augmentant jusqu'à 2500 ou 3000 excitations par seconde, qu'ils restent stationnaires entre 3000 et 5000, et vont ensuite en décroissant jusqu'à 10000, de sorte qu'un courant ayant 3000 alternances est plus douloureux qu'un courant de 10000, et beaucoup moins qu'un courant de 150 seulement et même de 40 avec la machine Gramme. Ces expériences me portent à croire que les machines à courants alternatifs, *de puissance égale*, seront d'autant moins dangereuses que la fréquence des courants qu'elles engendrent sera elle-même plus grande, contrairement à ce qu'on aurait pu supposer. Quelle explication donner à ce fait expérimental? Je n'en vois que deux possibles : une, physique, bien démontrée; l'autre, physiologique et hypothétique. Il est bien démontré aujourd'hui que, dans le cas des courants alternatifs, la loi d'Ohm $I = \frac{E}{R}$ n'est plus applicable ; la distribution du courant alternatif dans le conducteur est tout autre que dans le cas du courant constant.

« Le courant alternatif se porte surtout à la surface du conducteur comme l'électricité statique. Sa pénétration dans le conducteur est d'autant moindre que la fréquence est plus grande. Dans le cas des courants alternatifs, la conductibilité d'un conducteur cylin-

drique croît seulement comme sa surface. Lorsque la fréquence est suffisante par conséquent, le courant passant par le corps d'un animal ne pénétrera pas et s'écoulera tout entier par la surface; c'est là sans doute qu'il faut chercher l'explication de la diminution du danger à mesure qu'augmente la fréquence. On peut supposer, en second lieu, que les tissus ne sont plus excitables par des chocs suffisamment rapides; dans le cas actuel, on ne peut admettre cette explication, puisque j'ai démontré autrefois (*) qu'un muscle peut reproduire la parole et répondre, par conséquent, à plus de 10000 excitations par seconde.

« Pour savoir si le nerf et le muscle peuvent répondre à des excitations électriques extrêmement rapides, j'ai abandonné tous les interrupteurs électriques mécaniques qui peuvent donner très difficilement 30000 excitations par seconde, je me suis servi d'un dispositif qui peut donner jusqu'à mille millions de vibrations électriques par seconde. C'est l'appareil bien connu des physiciens depuis les admirables recherches du Dr Hertz sur les oscillations électriques. J'ai donc installé un vibrateur de Hertz dont la période calculée par la formule de Thomson, $T = 2\pi\sqrt{LC}$, est de 20 à 25 billionièmes de seconde. Un *résonateur* de Hertz, modifié par M. Joubert, installé à 50 centimètres du vibrateur, donne des étincelles de 5 millimètres à 6 millimètres de longueur au maximum, Eh bien, à l'aide d'étincelles de cette force, il m'a été impossible d'exciter une patte galvanoscopique des plus sensibles dans les conditions où j'ai opéré. M. Joubert m'a dit qu'il n'avait pas été plus heureux que

(*) Voir *Comptes rendus de la Société de Biologie*, année 1885, p. 454.

moi lorsqu'il a répété les expériences de Hertz au Laboratoire central d'électricité. Constamment la grenouille a refusé de se contracter, bien que le résonateur de M. Joubert donnât des étincelles de plus de 1 centimètre.

« D'ailleurs, si l'on reçoit ces étincelles sur un doigt, sur le bout du nez, sur la pointe de la langue, etc., on n'éprouve absolument aucune sensation de piqûre, alors que le choc serait, au contraire, très douloureux, si l'on recevait une étincelle de pareille longueur provenant d'un appareil de Ruhmkorff. Les nerfs sensitifs et les nerfs moteurs sont donc insensibles à des excitations ou à des ondulations électriques qui atteignent 20 à 30 millions par seconde. Nous n'avons pas de nerfs, ou plutôt de terminaisons nerveuses sensitives correspondant à cette période vibratoire. En revanche, nous en avons d'autres qui sont accordées pour des mouvements vibratoires beaucoup plus rapides, allant de 100 à 400 billions de vibrations par seconde (ondulations calorifiques), ce sont les terminaisons nerveuses transmettant les impressions de chaleur et de froid. D'autres terminaisons nerveuses (rétine) sont sensibles à des ondulations encore plus rapides, comprises entre 497 billions (rouge) et 728 billions par seconde (violet). Au delà de 728 billions par seconde, nous ne connaissons ces mouvements ondulatoires de l'éther que d'une manière indirecte (fluorescence, photographie, etc.). On pourrait, d'après cela, diviser les terminaisons nerveuses en deux catégories spéciales. Les unes seraient sensibles à certaines ondulations de l'éther, c'est-à-dire aux vibrations transversales, d'une période déterminée ; les autres (terminaisons acoustiques, corpus-

cules du tact, etc.), ne seraient, au contraire, influencées que par les vibrations de la matière pondérable (vibrations de l'air, des corps solides, etc.), d'une période infiniment plus longue. »

Action physiologique et thérapeutique des courants à haute fréquence.

« Si je rappelle ces dates, c'est simplement pour montrer que la publication de M. Tesla, qui fut faite seulement le 23 mai 1891, à New-York, n'a été pour rien dans mes recherches.

« Comme le disait notre collègue, M. Hospitalier, le *problème de l'action physiologique des courants de toutes les fréquences* était résolu en France par M. d'Arsonval, bien avant les communications de M. Tesla.

« C'est du reste ainsi qu'en a jugé l'Académie des Sciences en m'attribuant, à l'unanimité, le prix La Caze, en 1893.

« Ces expériences, connues seulement des physiologistes, étaient ignorées de la plupart des électriciens. Cela tenait à ce que, l'énergie électrique qu'on pouvait faire passer à travers le corps par le dispositif de Hertz étant très faible, l'expérience n'était pas saisissante.

« Dans ses remarquables recherches sur la production de la lumière par les hautes fréquences, Tesla, tout en conservant le principe de l'appareil de Hertz comme générateur, employa un dispositif plus puissant. Le professeur Elihu Thomson généralisa le procédé en le simplifiant considérablement.

« Ces deux dispositifs sont trop connus aujourd'hui pour que je les décrive ici. Ni l'un ni l'autre, néan-

moins, ne pouvaient être employés d'une façon constante et vraiment pratique pour le but que je poursuivais, à savoir l'électrisation des êtres vivants et, en particulier, de l'homme.

« La double bobine noyée dans l'huile n'était pas pratique, et la possibilité de mettre en contact le patient, à un moment donné, avec un des pôles du transformateur à basse fréquence m'a fait écarter ces deux procédés pour les remplacer par le suivant, que j'emploie exclusivement en médecine et dont la figure ci-jointe donne le schéma. Ce sont les expériences de M. O. Lodge sur les paratonnerres qui m'en ont donné l'idée. Soient AA' (*fig.* 7) les armatures internes de deux bouteilles de Leyde montées en cascade. Ces armatures sont réunies à une source d'électricité à haut potentiel (machine statique, bobine Ruhmkorff ou transformateur industriel). Les armatures externes BB' sont réunies entre elles par un solénoïde CC' composé d'un gros fil de cuivre ou d'un tube faisant 15 à 20 tours et dont le diamètre varie suivant les circonstances. Chaque

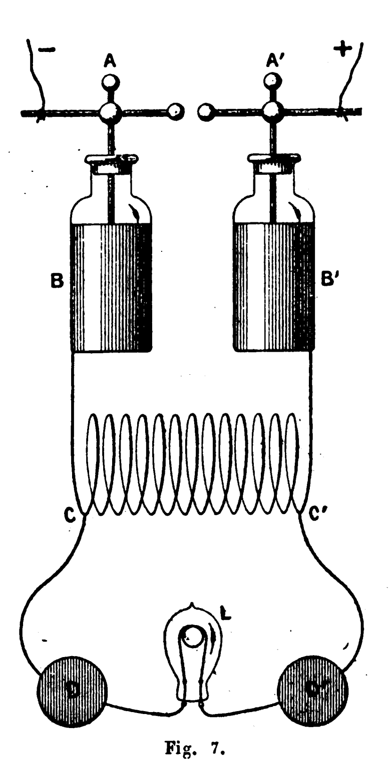


Fig. 7.

fois qu'une étincelle éclate en AA′, un courant oscillant extrêmement énergique prend naissance dans le solénoïde, à tel point qu'en prenant comme pôles ses extrémités C, C′, on obtient un courant qui peut allumer au blanc 5 à 6 lampes à incandescence L, tenues entre deux personnes placées en D, D′. Ces lampes, dans l'expérience que je vous montre, exigent, pour s'allumer au point où vous les voyez, une différence moyenne de potentiel de 900 volts et une intensité de plus d'un ampère.

« Dans ces conditions, l'action sur les nerfs sensibles et sur les muscles est, comme vous le voyez, absolument nulle.

« On varie à volonté l'intensité du courant qui traverse le corps en prenant un nombre variable de spires du solénoïde. Ce dispositif est absolument sans danger, puisque, d'une part, l'opérateur ne peut être en rapport avec la basse fréquence qui arrive en A et A′, et que, d'autre part, si le condensateur venait à crever durant l'expérience, le solénoïde formerait court-circuit entre les pôles du transformateur.

« On peut obtenir, entre les deux extrémités du solénoïde, des étincelles de 4 à 6 centimètres de longueur, tension plus que suffisante dans la plupart des applications médicales, ce qui évite d'avoir recours à un transformateur noyé dans l'huile. On peut augmenter la longueur des étincelles en employant, comme le fait le Dr Oudin, un deuxième solénoïde (n° 3 de la fig. 8) qui forme résonateur.

« On peut faire fonctionner l'appareil de deux façons différentes. Pour les installations portatives, j'utilise, comme source d'électricité, une bobine de

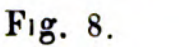


Fig. 8.

Ruhmkorff pouvant fournir de 100 à 200 watts dans le circuit d'utilisation.

« Pour éviter le collage du trembleur, j'ai fait établir une modification à l'appareil classique par mon habile constructeur, M. Gaiffe. La pointe qui correspond à l'enclume, au lieu d'être fixe, est animée d'un mouvement de rotation continue sur elle-même, grâce à un petit moteur qui fait tourner la roue dentée portant le contact de platine.

« La fig. 8 est suffisamment explicite.

« Ce moteur est mis en mouvement par une dérivation du courant continu animant la bobine. Le collage est ainsi rendu impossible. Quant aux condensateurs reliés en cascade, ils se composent de deux condensateurs plans logés dans la boîte voisine de la bobine qui porte sur le côté le solénoïde et l'exploseur ainsi que le montre la fig. 2.

« En employant la bobine de Ruhmkorff actionnée par des accumulateurs, il n'est pas besoin de souffler l'étincelle, mais l'énergie disponible est limitée à quelques centaines de watts. Cet appareil est néanmoins suffisant pour la plupart des applications thérapeutiques. Pour la haute fréquence, il n'est point nécessaire d'avoir de longues étincelles ; il vaut mieux des interruptions rapides et de la quantité. Quand on veut de longues étincelles, il faut interrompre le courant primaire dans un liquide comme l'avait fait Foucault. On substitue avec avantage le cuivre rouge au platine et l'eau à l'alcool. La meilleure interruption est donnée par le frottement, cuivre rouge sur cuivre rouge, dans l'eau. Une roue de Masson tournant dans l'eau constitue un excellent interrupteur pour étincelles longues et fréquentes.

« On obtient des effets incomparablement plus puissants en employant le courant alternatif à basse fréquence provenant d'un secteur ou d'un alternateur quelconque.

« J'ai éprouvé un certain nombre de difficultés quand j'ai voulu utiliser le courant du secteur de la rive gauche, à 110 volts et 42 périodes, pour marcher d'une façon continue comme cela était nécessaire quand j'ai voulu voir comment se comportaient les êtres vivants dans ces conditions.

« J'ai pu les éliminer successivement et vous avez sous les yeux une installation de 3000 watts qui me donne entière satisfaction. Cette installation est actionnée par le courant alternatif du secteur de la rive gauche à 110 volts et 42 périodes.

« Ce courant arrive au primaire d'un transformateur construit spécialement pour moi par M. Labour, et qui est noyé dans une caisse métallique remplie de paraffine. Le primaire peut absorber 30 ampères sous 110 volts. Le circuit secondaire donne 15000 volts et 2 dixièmes d'ampère. Le transformateur est à circuit magnétique fermé, type Labour.

« Ici s'est présenté un gros inconvénient. Les deux boules terminant le déchargeur sont en communication avec les armatures internes des deux condensateurs et aussi avec le circuit à haute tension du transformateur.

« Il en résulte qu'à chaque fois qu'éclate l'étincelle le transformateur se trouve fermé sur lui-même. On a beau souffler l'arc avec un jet d'air ou un champ magnétique, cet arc laisse passer non seulement le courant à haute fréquence, mais aussi le courant à basse fréquence émanant directement du transfor-

mateur. Les boules du déchargeur sont rapidement détruites, le transformateur peut être brûlé, et l'on consomme inutilement du courant.

« Dans un premier dispositif, j'avais évité ces deux inconvénients en coupant le circuit à haute tension du transformateur (*) par un premier condensateur, de capacité variable, suivant l'énergie dont on veut disposer; le deuxième condensateur, qui est le siège des oscillations électriques et qui porte le déchargeur, se trouve monté en série avec le premier qui constitue *le condensateur de garde*. De cette manière, jamais le transformateur n'est fermé sur lui-même. En réglant convenablement les capacités du condensateur de garde et du condensateur à haute fréquence, il n'est plus nécessaire de souffler l'étincelle constituée uniquement, dans ce cas, par des décharges à haute fréquence.

« Ce dispositif, quoique efficace, est un peu compliqué, et je lui préfère aujourd'hui le suivant qui est celui qui fonctionne sous vos yeux. Il consiste simplement à intercaler *en série*, avec le primaire du transformateur, une bobine à self-induction variable par le déplacement d'un noyau de fer doux, de dimensions appropriées, dans son intérieur. Vous pouvez voir qu'en manœuvrant ce noyau de fer doux je limite à volonté l'énergie traversant le transformateur, et que de plus je souffle l'arc à volonté en rendant la décharge oscillante. Ce dispositif très simple est absolument efficace.

« Pour pouvoir marcher indéfiniment sans crever les condensateurs, il suffit de prendre deux jarres

(*) Voir *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 6 juillet 1896.

cylindriques de Leyde, de coller les armatures internes d'étain *avec du suif* et de remplir ensuite la bouteille avec de l'eau que surmonte une couche d'huile de vaseline. Dans ces conditions, l'appareil peut fonctionner nuit et jour sans aucun arrêt pour les expériences de longue haleine.

« En examinant la décharge dans un miroir tournant porté par l'axe d'un moteur synchrone faisant quarante-deux tours par seconde (vitesse périodique du secteur), on a une image fixée dans l'espace. On voit alors que le nombre de décharges données par le condensateur, durant une période, est proportionnel à l'intensité du courant qui traverse le transformateur. De telle sorte qu'on peut, *sans changer la fréquence*, augmenter à volonté l'énergie disponible par le simple déplacement du noyau de fer doux dans la bobine de self.

« Les effets que l'on obtient dans ces conditions sont vraiment surprenants, comme vous pouvez en juger.

« 1° Voici un solénoïde de 80 centimètres de diamètre, présentant sept tours d'un câble de 15 millimètres carrés, qui est parcouru par la décharge oscillante provenant du condensateur. Le transformateur absorbe en ce moment 10 ampères sous 110 volts, soit 1100 watts. Huit lampes de 110 volts 1 ampère, placées en dérivation sur le solénoïde, sont allumées au blanc éblouissant. Le rendement en énergie lumineuse de la haute fréquence est très bon, soit dit en passant.

« En mesurant, comme je l'ai fait, la puissance dépensée au compteur général, d'une part, et l'intensité lumineuse des lampes allumées alternativement

au même point, tantôt par la basse fréquence, tantôt par la haute fréquence, la consommation accusée par le compteur augmente relativement peu dans le second cas, malgré les transformations multiples du courant. Je reprendrai ultérieurement ces mesures d'une façon plus précise.

« 2° On approche du solénoïde une lampe de 20 volts 1 ampère, fermant le circuit d'une seule spire de gros fil; elle s'allume au blanc éblouissant à plus d'un mètre du solénoïde.

« 3° Un seul tour de fil, placé dans le solénoïde, allume deux lampes de 110 volts placées en série, etc....

« 4° J'environne de deux ou trois tours de gros fil, parcouru par la haute fréquence, le réservoir d'un thermomètre à mercure. En quelques secondes, nous arrivons à la température d'ébullition du mercure par induction. Je m'étais servi de ce procédé, au début de mes recherches, pour mesurer l'intensité du champ dans le solénoïde.

« Si j'insiste sur la puissance d'induction d'un solénoïde parcouru par les courants à haute fréquence, c'est que j'ai mis ce phénomène à profit pour instituer un procédé d'électrisation du corps humain entièrement nouveau en électrothérapie et très efficace. J'ai donné à ce procédé le nom d'*autoconduction* (*).

« Il consiste à enfermer l'être à électriser dans un solénoïde, sans aucune communication métallique avec lui (*fig.* 9 et 10). Ce solénoïde étant parcouru par le courant à haute fréquence, induit des courants énergiques non seulement à la surface, mais dans les plus petites particules du corps humain, comme je le mon-

(*) Voir *Société de Biologie*, 4 février 1893.

trerai plus bas. On peut s'en rendre compte par les expériences suivantes :

« Si, étant placé dans le solénoïde, un homme arrondit les bras de façon à former un circuit circulaire complété par une petite lampe à incandescence dont les extrémités du filament correspondent aux deux mains ; cette lampe s'allume par suite du courant induit dans les bras. Pour que l'expérience réussisse bien, il faut tremper chaque main dans un vase contenant une solution saturée de chlorhydrate d'ammoniaque légèrement alcaline. Cette solution fait tomber la résistance d'une main à l'autre, à moins de 600 ohms par imbibition de l'épiderme. Comme la force électromotrice moyenne induite par le solénoïde, dans une seule boucle peut dépasser 100 volts, on voit que l'intensité du courant engendré dans les bras peut atteindre $\frac{100}{600}$ = 166 milliampères environ.

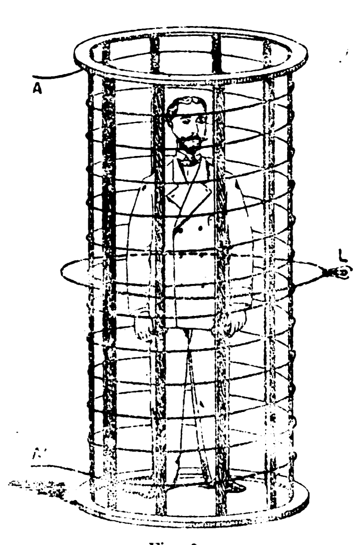


Fig. 9.

« On peut répéter la même expérience en formant un circuit circulaire avec plusieurs animaux placés en série ; l'anguille de rivière convient très bien pour cette expérience, vu sa forme allongée. Ce procédé d'électrisation ne donne absolument aucune sensation, bien qu'il agisse très énergiquement sur l'organisme, comme nous allons le voir.

« Une deuxième méthode d'électrisation avec la haute fréquence consiste à relier le segment du corps à électriser aux extrémités du solénoïde à l'aide d'électrodes appropriées. On gradue l'intensité du courant en prenant un nombre variable de spires. L'action sur la sensibilité est nulle aussi dans ce cas si le circuit est continu.

« Si, au contraire, on crée une interruption en un point quelconque du circuit métallique, chaque fois que l'étincelle éclate, les muscles se contractent,

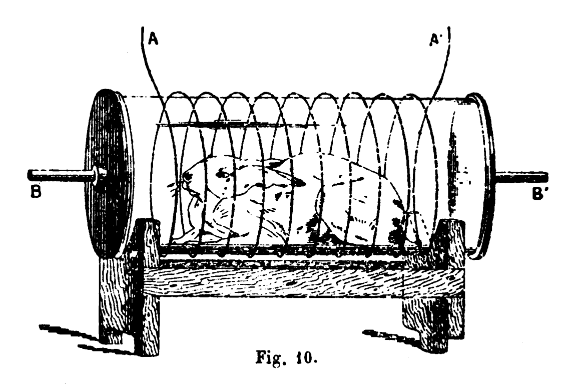


Fig. 10.

mais sans douleur. On peut tirer également des étincelles du corps de l'individu placé dans le solénoïde.

« Une troisième méthode consiste à agir par condensation. Le sujet, dans ce cas, constitue l'armature d'un condensateur dont l'autre armature est très voisine de lui. C'est le dispositif que réalise la chaise longue que vous avez sous les yeux (*fig.* 11). On arrive facilement à faire traverser le système par un courant moyen de plus de 300 milliampères.

« La haute fréquence permet également le passage du courant dans des circuits ouverts. Si faible, en effet, que soit leur capacité, la charge et la décharge

répétées des centaines de mille fois par seconde, sous un potentiel élevé, représentent un courant moyen notable. C'est ce qui explique les courants unipolaires

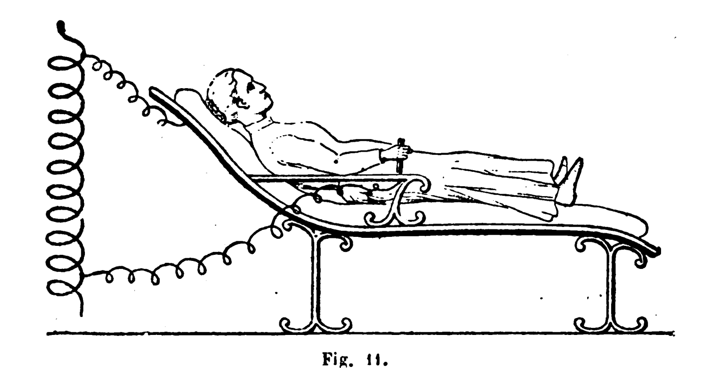


Fig. 11.

et les étincelles que l'on obtient en touchant un seul point du solénoïde. Ces applications unipolaires sous formes d'aigrettes et d'effluves donnent des résultats importants dans nombre de cas et, notamment, lorsqu'il s'agit de modifier certains états du tégument externe dans les maladies de la peau et des muqueuses.

« Pour mesurer l'intensité de ces courants, je me sers du galvanomètre que vous avez sous les yeux et qui est une modification du Cardew (*fig.* 12). Il porte une double graduation en milliampères et en volts. Il sert aussi bien à la mesure des courants continus qu'à celle des courants alternatifs de toutes les fréquences puisqu'il est dénué de self-induction. C'est un instrument universel très commode en électrothérapie.

« Pour les courants très intenses parcourant le solénoïde, je procède à leur mesure de la façon suivante Le solénoïde est constitué par un tube creux très

mince, plein d'air. Ce tube constitue le réservoir d'un thermomètre différentiel de Leslie qui mesure son propre échauffement. On le gradue empiriquement à l'aide d'un courant à basse fréquence dont on mesure l'intensité à l'aide d'un ampèremètre ordinaire placé en série avec le solénoïde.

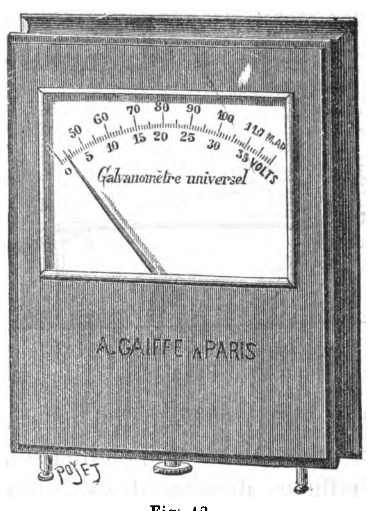


Fig. 12.

« Telles sont les dispositions essentielles pour la production et l'utilisation pratique des courants à haute fréquence. Je vais, à présent, vous indiquer rapidement les principaux effets de ces courants au point de vue de leur action sur l'organisme.

« Que ces courants soient appliqués directement, par condensation ou par autoconduction, les effets généraux sont sensiblement les mêmes, à l'intensité près :

« 1° L'effet le plus singulier et le plus frappant des courants à haute fréquence, c'est leur absence totale d'action sur la sensibilité. Leur passage, même à intensité formidable, ne provoque à travers l'organisme ni sensation consciente ni mouvement d'aucune espèce. Je le démontre, comme vous le voyez ici, par exemple, en faisant allumer, entre deux individus, quatre lampes à incandescence de 125 volts 1 ampère.

« La sensation est nulle. On peut aller jusqu'à 3 ampères; mais, au-dessus de cette intensité, on éprouve dans les poignets une sensation de chaleur désagréable.

« Aussi, en présentant mes expériences à l'Académie des Sciences, il y a cinq ans, M. Cornu ajoutait : « M. d'Arsonval nous a rendus témoins, M. Marey « et moi, des principaux résultats consignés dans la « Note précédente. Nous avons été particulièrement « frappés de l'expérience dans laquelle six lampes « (125 volts — 0,8 ampère) ont été portées à l'incan- « descence dans le circuit formé par nos bras, circuit « formant dérivation sur les extrémités du solénoïde « induit par les décharges oscillantes. Nous n'avons « pas éprouvé la moindre impression par le passage « du flux électrique auquel nous étions soumis; on ne « pouvait cependant pas douter de l'énorme quantité « d'énergie traversant notre corps (900 volts + 0,8 am- « père = 720 watts); elle se manifestait soit par l'in- « candescence des lampes, soit par les étincelles « vives et nombreuses qui se produisaient à la rup- « ture du circuit. Cette même quantité d'énergie élec- « trique, transmise sous forme de courants alternatifs « à longues périodes (de 100 à 10000 par seconde), « aurait suffi pour nous foudroyer; dans les condi- « tions ci-dessus, elle ne produisait aucune sensation « appréciable. »

« Appliqué localement, à la surface de la peau ou des muqueuses, de manière à produire une effluve ou une pluie de feu, le courant à haute fréquence amène rapidement sur les parties touchées un degré d'insensibilité qui peut aller jusqu'à l'anesthésie complète. Cette insensibilité ne pénètre pas profondément et per-

siste seulement de quelques minutes à un quart d'heure. On constate le même phénomène sur les nerfs mis à nu, ainsi que je l'avais signalé dès le début de mes recherches avec l'oscillateur de Hertz. Le nerf moteur musculaire n'était pas excité par les vibrations hertziennes, mais il était anesthésié au point de ne pouvoir répondre de quelque temps aux autres genres d'excitations. Ce mode d'anesthésie superficielle est susceptible de rendre des services soit dans les cas d'opérations légères, soit pour calmer des névralgies superficielles.

« L'action de l'effluve à haute fréquence a donné des résultats remarquables, surtout dans les maladies superficielles de la peau s'accompagnant de plaies et d'éruptions diverses, tels qu'ulcères superficiels, syphilides, diverses formes d'eczéma, etc....

« Le Dr Oudin, à Paris, et surtout le Dr Coignet et le professeur Gailleton, de Lyon, ont donné des observations absolument remarquables de la rapidité avec laquelle disparaissent certaines dermatoses sous l'influence de l'effluve à haute fréquence.

« 2° L'action la plus remarquable de la haute fréquence, c'est l'activité extraordinaire qu'elle imprime aux échanges nutritifs et à la vie cellulaire.

« J'ai démontré cette action importante de plusieurs manières :

« A. En analysant sur l'homme et les animaux les produits de la combustion respiratoire avant et après l'action de la haute fréquence ; on voit augmenter dans des proportions considérables l'oxygène absorbé, et l'acide carbonique émis par la respiration dans l'unité de temps. Ce volume a pu passer chez moi de 17 litres à 37 litres à l'heure, et il est possible d'ob-

tenir des nombres plus élevés. Cette augmentation des combustions respiratoires se retrouve également dans l'augmentation du chiffre de l'urée, ainsi que le montrent les centaines d'analyses d'urine faites par les docteurs Apostoli, Charrin, etc....

« B. Cette suractivité se traduit également par une augmentation de la chaleur émise par le corps, ainsi qu'il est facile de s'en assurer à l'aide de l'appareil que j'ai appelé *anémo-calorimètre*. Il consiste (*fig.* 13) en un très grand solénoïde vertical dans l'axe duquel se place le sujet. A l'*intérieur* du solénoïde (non représenté sur la figure) se trouve un manchon athermane constitué par un drap épais.

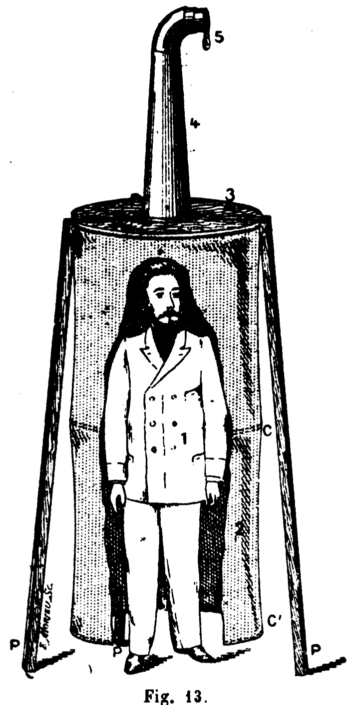


Fig. 13.

« Ce manchon se termine à la partie supérieure par un disque de bois portant une cheminée sur laquelle on ajuste un anémomètre Richard très sensible (*fig.* 14). Sous l'influence de la chaleur dégagée par l'individu, un courant d'air s'établit dans la cheminée et l'anémomètre en mesure le débit.

« On gradue empiriquement l'instrument en remplaçant l'homme par une source de chaleur connue (résistance traversée par un courant). Cet appareil est

extrêmement sensible ; la présence d'un homme dans l'appareil fait faire au moulinet plus de 12 000 tours à l'heure. Les indications en sont très rapides, et cinq minutes d'observation suffisent pour faire une expérience comparative. On constate que la chaleur émise par le corps humain avant et après l'électrisation peut varier, comme elle l'a fait chez moi, de $79^{cal},6$ à $127^{cal},4$ par heure, à la température moyenne de 17°.

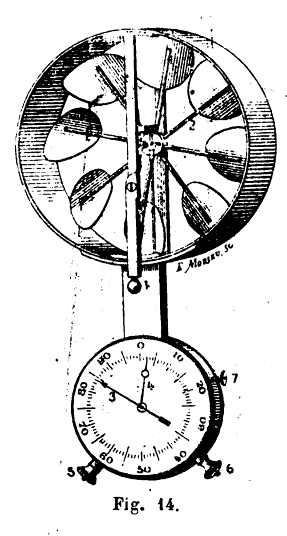


Fig. 14.

Inutile de dire que l'on s'est assuré que le passage du courant dans le solénoïde dégage une quantité de chaleur négligeable, dont on a tenu compte d'ailleurs. Malgré cette augmentation des combustions respiratoires, la température centrale de l'organisme s'élève à peine, car l'excédent de chaleur est perdu par rayonnement et évaporation, par suite des modifications circulatoires importantes que provoque la haute fréquence.

« C. L'exagération des combustions organiques peut être mise en évidence également par la balance qui mesure la perte de poids subie par les animaux. J'ai placé le solénoïde renfermant l'animal en expérience sur le plateau d'une balance enregistrante Richard. Voici quelques-uns des résultats que j'ai obtenus : un petit cochon d'Inde placé dans le solénoïde, non parcouru par le courant, a perdu 6 grammes de son poids en seize heures. On rend le solénoïde actif ; le cochon d'Inde a perdu alors 30 grammes de son poids dans le

même espace de temps (seize heures). Je supprime de nouveau le courant; il se passe alors un phénomène assez inattendu: l'animal *gagne en poids* pendant deux heures. Au bout de ce temps, il a augmenté de 1 gramme environ. Regnault et Reiset ont constaté un phénomène analogue chez certains de leurs animaux, qui, pendant le sommeil, fixaient plus d'oxygène qu'ils n'éliminaient d'acide carbonique et de vapeur d'eau. Après ces deux heures, la perte de poids reprend sa marche, tout en restant plus faible. Ce n'est guère qu'une demi-heure après l'établissement du courant que la perte de poids prend son régime uniforme. Les animaux étaient placés dans un solénoïde disposé pour recevoir leurs déjections, qui tombaient dans de l'huile, de façon à éviter l'évaporation. L'échauffement de la cage, dû au courant seul, n'élevait pas sa température de 1°, élévation absolument sans influence sur l'animal. Le second cobaye perdait 6 grammes de son poids en cinq heures, à l'état normal, et 24 grammes dans le même temps, quand le courant passait. Un lapin a perdu 48 grammes en huit heures dans la haute fréquence et seulement 23 grammes durant le même temps, à l'état normal.

« La perte de poids semble donc être plus accentuée pour les animaux de petite taille, sous l'influence du courant.

« 3° Nous venons de voir que la haute fréquence était sans action consciente sur les nerfs de la sensibilité générale et du mouvement musculaire; il ne faudrait pas en conclure que tous les appareils nerveux sont dans le même cas. Le système nerveux vasomoteur, celui qui met en jeu la contractilité des vaisseaux artériels et veineux, est, au contraire, éminem-

ment excitable par les courants à haute fréquence. Sous leur action, on voit, par exemple chez le lapin, les vaisseaux de l'oreille se dilater très rapidement comme après la section du grand sympathique. Cet effet est suivi, un peu plus tard, d'une contraction énergique.

« Le sphygmographe de Marey, le sphygmomanomètre de Potain, appliqués sur l'homme, donnent des indications identiques. On voit la pression sanguine s'abaisser d'abord, puis, peu après, se relever et se maintenir à ce taux élevé ; en faisant une légère incision à l'extrémité de la patte d'un lapin, on voit le sang couler beaucoup plus abondamment après le passage du courant. Le manomètre à mercure, mis en rapport direct avec une artère, chez les animaux, donne les mêmes indications.

« Ces faits montrent d'une façon indubitable que les courants à haute fréquence pénètrent profondément dans l'organisme au lieu de s'écouler simplement à la surface ; nous en verrons, d'ailleurs, des preuves directes. Leur innocuité ne peut donc s'expliquer par cette raison, comme je l'ai montré dès le début de mes recherches.

« 4° Ce n'est pas par l'intermédiaire seulement du système nerveux ou des centres vaso-moteurs que la haute fréquence exagère les fonctions vitales. Cette suractivité porte sur la cellule elle-même et sur le protoplasma directement. Pour en avoir la preuve, je me suis servi d'êtres monocellulaires, comme la levure de bière et les différents bacilles. Les résultats ont été les mêmes. Avec mon assistant, le Dr Charrin, nous avons étudié l'action de la haute fréquence sur les bacilles pathogènes et, entre autres, sur le bacille du pus bleu, ou bacille pyocyanique.

« Les courants à haute fréquence atténuent très nettement ce bacille au bout de quelques minutes. La fonction chromogène est tout d'abord supprimée; si l'expérience dure une demi-heure, on arrive à tuer le bacille. Les cellules végétales sont également influencées par la haute fréquence, ainsi que le montrent des expériences en cours d'exécution, mais ce ne sont pas seulement les bacilles qui sont influencés par ces courants. Leur action modifie d'une façon non moins profonde leurs produits de sécrétion, ce qu'on appelle les *toxines* microbiennes.

« Voici ce que nous en disions, Charrin et moi, dans une Note présentée le 10 février 1896 à l'Académie des Sciences :

« Nous avons précédemment étudié l'action des diverses modalités de l'énergie électrique sur les microbes, nous avons poursuivi depuis cette étude en l'étendant aux toxines sécrétées par ces microrganismes. Cette Note a pour but de faire connaître les résultats auxquels nous sommes déjà arrivés dans cette voie nouvelle.

« Quelques essais ont été tentés dans le même sens, notamment par MM. Smirnoff et Kruger. Ces auteurs se sont bornés à employer une seule modalité électrique : *le courant continu.* Cette forme particulière de l'énergie électrique se prête très mal à une étude de la question, parce que le passage du courant continu à travers un liquide contenant des toxines bactériennes se complique forcément de phénomènes d'ordre chimique.

« Indépendamment des produits *polaires* de l'électrolyse, il y a, dans l'espace interpolaire, toute une série de décompositions et de combinaisons chimiques

qu'engendre le transport des ions. Il est donc impossible, avec le courant continu, de faire la part qui revient exclusivement à l'électricité dans les phénomènes observés.

« Des expériences préliminaires que nous ne rapporterons pas ici, faites, d'une part, avec le courant continu et, d'autre part, avec le courant induit direct ou l'extra-courant d'une bobine, nous ont montré que les modifications imprimées aux toxines n'étaient nullement en rapport avec la *quantité* d'électricité les ayant traversées. Avec des courants induits, *toujours dirigés dans le même sens*, et s'accompagnant par conséquent d'électrolyse, le passage de 7 coulombs a produit des modifications plus profondes que celui de 78 coulombs provenant du courant continu. Cette expérience nous a donc clairement montré que l'ébranlement moléculaire produit par les décharges électriques provenant de la bobine était un agent modificateur infiniment plus actif que l'électrolyse.

« Pour éliminer toute action d'ordre électrolytique, c'est-à-dire d'ordre chimique, nous avons en conséquence été conduits à adopter la modalité électrique qui produit les ébranlements les plus rapides que l'on connaisse : *les courants alternatifs à haute fréquence*. Le dispositif employé (*fig.* 15) est celui que M. d'Arsonval a signalé antérieurement à l'Académie dans une Note en date du 3 juillet 1893.

« L'appareil se compose, en principe, d'un transformateur B, à haut potentiel et basse fréquence, dont le secondaire est relié aux armatures intérieures de deux condensateurs C_1, C_2, reliés eux-mêmes à un déchargeur à boules M. Les armatures extérieures de ces condensateurs sont reliées en cascade par un so-

lénoïde S. Des extrémités du solénoïde partent deux fils de platine, qui amènent le courant à haute fréquence par un tube en U, en verre, qui contient la toxine. Ce tube est plongé lui-même dans un vase contenant de l'eau glacée, qui empêche tout échauffement du liquide pendant le passage du courant. La fréquence est, comme on le sait, fonction de la capacité conjuguée des condensateurs C_1, C_2 et de la self-

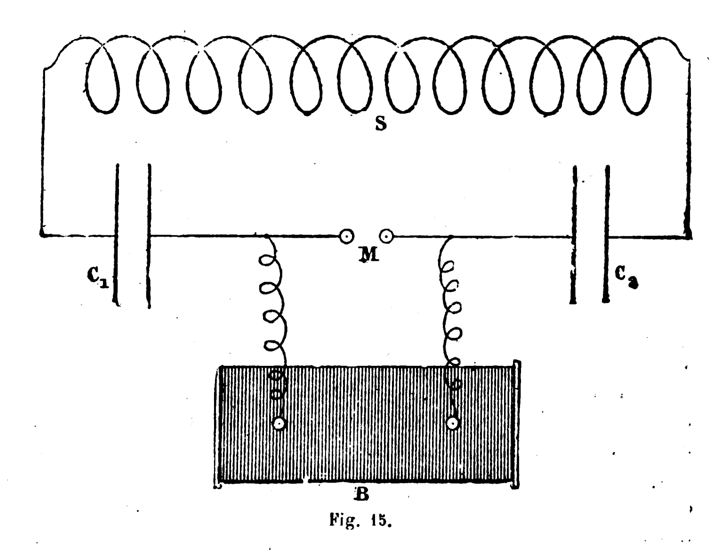


Fig. 15.

induction du solénoïde S. Dans les expériences rapportées ci-dessous, la fréquence, calculée d'après la formule de Thomson, est de 225 000 oscillations par seconde.

« L'intensité *efficace* du courant traversant la toxine, mesurée au moyen d'un galvanomètre spécial (*), était de 0,75 ampère; et la densité *moyenne* du courant de

(*) Voir ma Note à l'Académie en date du 15 juillet 1895. D'ARSONVAL.

250 milliampères par centimètre carré. Ces chiffres ne donnent que l'intensité *efficace* du courant; quant à l'intensité *initiale*, elle est infiniment supérieure et dépasse certainement 50 ampères.

« L'électricité passe donc à travers la toxine par *pulsations alternatives* extrêmement rapides et extrêmement intenses. Il est dès lors facile de comprendre de quelle puissance est ce branle-bas *totius substantiæ* imprimé à la toxine.

« Voici le résultat de quelques-unes de nos expériences :

« *Expérience I.* — Nous avons soumis au courant de haute fréquence, pendant un quart d'heure, une toxine diphtéritique très active. Nous en avons injecté 2^{cc},5 à trois cobayes, et la même dose, *avant électrisation*, à trois cobayes témoins. Le résultat a été des plus nets : les trois témoins sont morts en vingt, vingt-cinq et vingt-six heures. Des trois cobayes ayant reçu la toxine électrisée, un a survécu durant trois jours; les deux autres sont vivants à la date du 10 février, soit douze jours après.

« Trois autres cobayes ayant reçu 2^{cc},5 de la même toxine électrisée étaient survivants sept jours après l'injection et ont servi à l'expérience n° III.

« En somme, les trois témoins sont morts rapidement et, des six animaux injectés avec la toxine électrisée, un seul est mort trois jours après l'injection seulement. L'atténuation de la toxine diphtéritique par la haute fréquence est donc évidente.

« *Expérience II.* — Mêmes expériences avec la toxine pyocyanique injectée à la dose de 3^{cc}. Le témoin est mort trente-six heures après l'injection. Tous les cobayes (au nombre de quatre) injectés avec la même dose de toxine pyocyanique électrisée ont survécu.

« Il est donc très nettement démontré que ces toxines sont profondément atténuées par les courants

à haute fréquence. Ce fait est important, en ce sens qu'on peut espérer que cette atténuation pourra être faite *directement dans l'organisme malade*. Cette possibilité résulte de ce fait, mis en évidence par M. d'Arsonval, à savoir que le corps de l'homme peut être traversé par des courants de haute fréquence extrêmement puissants sans provoquer aucun phénomène douloureux ou moteur. Mais il y a plus. Non seulement ces toxines peuvent être atténuées par la haute fréquence, mais bien mieux, *après l'électrisation*, *elles deviennent des substances immunisantes*, *des vaccins*, comme le démontrent les expériences suivantes :

« *Expérience III.* — Le 3 février, on inocule $0^{cc},5$ de culture diphtéritique très active à trois cobayes ayant reçu il y a sept jours $2^{cc},5$ de toxine diphtéritique soumise à la haute fréquence (*Expérience I*). On inocule de même trois cobayes témoins. Le 5 février, deux témoins succombent; le troisième témoin meurt le 6 février. Le 7, un des trois cobayes vaccinés meurt également. Quant aux deux autres cobayes, ils sont actuellement bien portants (10 février), sept jours après l'injection.

« Il est juste de remarquer que ces animaux ont été inoculés uniquement dans le but de juger de l'atténuation des toxines électrisées et non dans celui de vacciner ces animaux. Si nous avions, suivant la règle adoptée en pareil cas, procédé par doses minimes d'abord, puis progressivement croissantes, nous aurions sans doute réalisé une immunité plus complète.

« *Expérience IV.* — Trois cobayes ayant reçu depuis dix jours 3^{cc} de toxine pyocyanique électrisée sont inoculés avec 2^{cc} de culture pyocyanique vivante. On inocule de même deux cobayes témoins. Les témoins meurent l'un trente-six heures, l'autre quarante-huit heures après l'injection.

« Quant aux trois animaux vaccinés, ils sont actuellement vivants, huit jours après l'injection.

« La toxine pyocyanique s'atténue donc par la haute fréquence comme celle du bacille de Löffler. Cette atténuation varie évidemment suivant l'énergie du courant et la durée de l'électrisation. Avec le courant que nous avons employé, au bout d'un quart d'heure, la toxicité est diminuée de moitié environ.

« Quoi qu'il en soit, nous pouvons conclure de ces faits :

1° *Que la haute fréquence atténue les toxines bactériennes ;*

2° *Que les toxines ainsi atténuées augmentent la résistance des animaux auxquels on les injecte.*

« Cette action particulière des courants à haute fréquence a été confirmée de divers côtés et nous en poursuivons l'étude. Les différents venins (vipère, cobra, etc.) se comportent comme les toxines et sont atténués par la haute fréquence, ainsi que je l'ai prouvé avec M. Phisalix pour les venins de la vipère et du serpent cobra. On a objecté (M. Marmier) que, pour la toxine diphtéritique, l'atténuation était due à l'échauffement de la solution par le passage du courant.

« Cette objection n'a aucune valeur, car jamais, dans nos expériences, la température des toxines n'a atteint 37°, c'est-à-dire la température normale des animaux.

« De plus, cette objection tombe devant les deux faits suivants : la haute fréquence atténue, d'une part, les toxines congelées et détruit, d'autre part, la virulence du venin de cobra. Or, pour détruire ce dernier venin, il faut le chauffer pendant au moins

trois heures à + 150°, c'est-à-dire à une température qu'on ne saurait atteindre en opérant à l'air à la pression normale.

« 5° Les expériences cliniques se poursuivent actuellement un peu de tous les côtés et dans tous les pays ; les résultats déjà obtenus confirment pleinement les indications données par la physiologie, à savoir la puissante action que ces courants exercent sur la nutrition.

« Voici quelques résultats que j'ai publiés à titre de document à l'Académie des Sciences (*) :

« Les courants à haute fréquence agissent puissamment pour augmenter l'intensité des combustions organiques, ainsi que je l'ai démontré précédemment. J'ai pensé, dès lors, que cette modalité particulière de l'énergie électrique donnerait de bons effets dans cette classe particulière de maladies, si bien étudiées par mon savant confrère et ami, le professeur Bouchard, sous le nom de *maladies par ralentissement de la nutrition*. Certaines formes du diabète sucré, la goutte, le rhumatisme, l'obésité, etc., sont dans ce cas.

« J'ai donc institué, depuis le commencement de cette année, une série de recherches cliniques sur ce sujet. Les expériences ont lieu à l'Hôtel-Dieu, dans le service dirigé par mon assistant, le docteur Charrin, et sous son contrôle, au point de vue médical. Les résultats obtenus jusqu'ici ont si complètement répondu à mon attente que je crois devoir en signaler quelques-uns dès maintenant.

« Voici dans quel esprit sont instituées ces recher-

(*) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 6 juillet 1896.

ches et quelle a été la marche suivie : je rejette complètement tous les résultats mettant en jeu l'appréciation du malade, pour tenir compte, exclusivement, des modifications physico-chimiques ou cliniques exactement et objectivement mesurables. J'élimine ainsi complètement les améliorations subjectives qui pourraient être attribuables à la suggestion. Cette cause, qu'invoquent trop légèrement certains médecins pour expliquer des cures indéniables dues à l'électricité, n'a aucune part dans les faits que je vais signaler. D'ailleurs, les résultats positifs, obtenus précédemment chez les animaux et que nous allons retrouver chez nos malades, écartent *a priori* cette objection.

« Les observations ci-dessous se rapportent à deux diabétiques et un obèse.

« Les variations de la température ont été prises deux fois par jour, de même que la pression artérielle, qui a été mesurée à l'aide du sphygmomanomètre de notre confrère, le professeur Potain.

« L'analyse des urines a été faite par M. Guillemonat, interne du service, qui a procédé de la façon suivante : chaque jour, sur l'urine émise dans les vingt-quatre heures, on prélève un cinquième, par exemple, du volume total. Tous les cinq jours, on fait une analyse. Par ce procédé, on a une moyenne qui élimine les causes d'erreur dues aux oscillations journalières de la diurèse. Les précautions sont prises naturellement pour mettre ces urines à l'abri de la décomposition.

« Le coefficient urotoxique de ces urines, coefficient dont on connaît aujourd'hui toute l'importance, grâce aux travaux de M. Bouchard, a été pris dans son laboratoire même par M. Charrin.

« Enfin l'application du courant a été faite avec grands soins, sur mes indications, par M. Bonniot, externe du service, un de mes auditeurs et élève des docteurs Tripier et Apostoli. Toutes les précautions, en un mot, ont été prises pour donner à ces observations le caractère de précision qui doit en assurer la valeur.

« Dans les observations ci-dessous, c'est le procédé par électrisation directe qui a été employé. Le courant émanant du solénoïde traverse le corps entier des pieds aux mains. Un des pôles du solénoïde est en rapport avec l'eau d'un pédiluve où le malade plonge ses deux pieds; le second pôle est relié aux deux mains par un conducteur bifurqué terminé par des poignées métalliques. Dans ces conditions, le courant est généralisé et son intensité a varié entre 350 et 450 milliampères; la durée des séances faites quotidiennement, d'abord de dix minutes, a été abaissée successivement à cinq et à trois minutes, suivant l'impressionnabilité des sujets. Ce courant, je le répète, n'exerce aucune action consciente, soit sur la sensibilité, soit sur la motricité, ce qui fait que les malades se soumettent sans répugnance à son action. Je résume à présent rapidement les observations :

« *Observation I.* — Homme de 33 ans, maçon atteint de diabète grave depuis quatre ans, est mis en observation pendant une quinzaine sans aucun traitement.

« Dans ces conditions, il rendait une moyenne de 11^{lit},300 d'urine en vingt-quatre heures, contenant 54 grammes de sucre par litre, soit 620 grammes de sucre par jour. La pression artérielle était de 15 centimètres de mercure seulement; le pouls à 72 et la température au-dessous de la normale. La toxicité des urines était presque nulle: 250 grammes injectés à un lapin le rendaient à peine malade.

« On applique la haute fréquence par séances quotidiennes de dix minutes. Dès les premiers jours, disparition des douleurs dans les membres, sommeil meilleur, non interrompu par la soif ou le besoin d'uriner, plus de cauchemars, clarté plus grande de la vue, retour de la mémoire et lucidité d'esprit rendant la lecture possible. Voilà pour les phénomènes subjectifs. Quant aux phénomènes objectifs : disparition d'un œdème malléolaire remontant jusqu'à mi-jambe, rétrocession d'un certain degré d'ascite et réveil de la sensibilité aux jambes, qui avait complètement disparu.

« Pendant le premier septénaire, peu de modifications du côté de l'urine et de la production du sucre, à l'exception de la diurèse, qui se régularise et ne présente plus de sauts brusques, passant de 7 à 13 litres dans les vingt-quatre heures.

« Dans le second septénaire, tout se modifie rapidement et, après quarante-deux jours de traitement, on constatait les faits suivants : moyenne de la quantité d'urine des vingt-quatre heures, 7 litres; sucre rendu en vingt-quatre heures, 180 grammes; pression artérielle atteignant 25 centimètres le vingtième jour; pouls à 104, température s'élevant jusqu'à 38° et se fixant enfin à 37°. Toxicité de l'urine considérablement accrue. Après un mois, 64 grammes tuent 1 kilogr. d'animal. Enfin, oscillations du poids, qui tombe d'abord de 57^{kg},500 à 51 kilogrammes pour remonter graduellement à 56 kilogrammes.

« *Observation II.* — Femme de 59 ans, diabétique grasse; présence du sucre constatée, il y a deux mois pour la première fois, à la Pitié; soignée à plusieurs reprises pour albuminurie. Actuellement, ni albumine, ni néphrite. Rend 3^{lit},300 d'urine en vingt-quatre heures, contenant 43 grammes de sucre par litre, soit 137 grammes par jour. Polyphagie, polydypsie, faiblesse générale, courbature et douleurs des membres. Pression artérielle très élevée, de 27 à 30 centimètres de mercure; pouls lent, à 64 par minute, température un peu au-dessus de la normale : oscille de 37°,3 à 37°,5. Toxicité des urines : 107 par kilogramme.

« Séances d'électrisation de dix minutes, bien supportées, mais laissant après un grand sentiment de lassitude. Après quinze jours de traitement, pas de variations dans la quan-

tité d'urine éliminée en vingt-quatre heures, mais le sucre a baissé de moitié, 24 grammes par litre au lieu de 43 grammes. La pression artérielle descend à 25 centimètres de mercure, le pouls monte à 76 ou 80, température peu influencée. Toxicité des urines monte à 87 par kilogramme. Malgré la diminution du sucre, le bien-être ressenti n'est pas aussi grand que chez le malade précédent. On suspend le traitement pendant quelques jours et on le reprend ensuite avec des séances abaissées successivement comme durée de dix minutes à trois minutes. Le bien-être ressenti est beaucoup plus grand, la malade se sent reposée, dort bien, n'a plus de courbature et le chiffre du sucre tombe à 38 grammes par vingt-quatre heures.

« Ce cas prouve de quelle importance est la technique en pareille matière. Quel doit être le nombre et la durée des séances? Doit-on les espacer, les suspendre? Autant de questions que l'expérience seule pourra trancher.

« *Observation III.* — Il s'agit d'un obèse âgé de 36 ans, cocher pesant 130 kilogrammes et présentant une arythmie cardiaque très marquée. Séances de dix minutes quotidiennes. Mieux pendant quelques jours. Le chiffre de l'urée excrétée s'élève de $33^{gr},72$ à $41^{gr},63$ en vingt-quatre heures. La pression monte de 18 à 20 centimètres de mercure, et le pouls passe de 72 à 108. Au bout de quinze jours, le malade avoue avoir des accès de dyspnée qu'il cachait, ayant grande confiance dans ce traitement et ne voulant pas le suspendre; le taux de l'urée baisse et tombe à 24 grammes par jour.

« On suspend les séances pendant une quinzaine et on les reprend avec une durée moindre : trois minutes au lieu de dix. Au bout de quelques jours, les mêmes phénomènes de dyspnée, d'abaissement du taux de l'urée et de la pression sanguine se montrent. On cesse le traitement. Quant à la toxicité des urines, elle a peu varié : 84 au début, 87 à la fin du premier essai.

« Cette observation montre que la haute fréquence agit, comme toujours, puissamment sur la circulation,

qu'il existe des contre-indications et qu'enfin la suggestion ne suffit pas pour expliquer les bons effets de l'électricité, puisque ce malade qui n'a pas bénéficié du traitement avait la foi, contrairement aux précédents qui furent tout étonnés de se trouver mieux.

« Si cette voie nouvelle ouverte à la thérapeutique est pleine de promesses, je dois prévenir les médecins que tout est à faire au point de vue clinique. J'ai montré expérimentalement que la haute fréquence est un puissant modificateur de l'organisme : là se borne, pour le moment, mon rôle de physiologiste.

« De son côté, le docteur Apostoli, après une expérience qui portait, à l'époque, sur 2446 applications et 267 analyses d'urine, disait, en 1895, au Congrès de Londres :

1° Conformément à ce qu'a découvert M. le professeur d'Arsonval, les courants alternatifs de haute fréquence et de haute tension exercent une action puissante sur tout corps organisé vivant qui est soumis à leur influence *inductrice*.

2° Le meilleur moyen d'agir, à l'aide de ces courants, par influence, est d'enfermer le malade, qui n'a aucun contact direct avec aucune électrode, dans le circuit d'un vaste solénoïde qui est parcouru par ces courants.

Le sujet se trouve de la sorte complètement isolé de la source électrique et les courants, qui circulent par *auto-conduction* dans son organisme, prennent naissance dans ses tissus eux-mêmes, car le corps joue ici le rôle d'un circuit fermé sur lui-même.

3° C'est ainsi que les découvertes physiologiques du professeur d'Arsonval se trouvent le mieux confirmées et que l'on peut vérifier l'influence puissante de ces courants sur le système *vaso-moteur*, bien que la sensation immédiate produite par leur passage soit nulle, et quoiqu'ils n'impressionnent ni les nerfs moteurs ni les nerfs sensitifs.

L'on peut constater, en effet, une action énergique sur tous les échanges nutritifs.

Cette action se produit par une suractivité des combustions

organiques et de la nutrition, comme en témoignent les dosages faits par M. d'Arsonval des échanges gazeux respiratoires, et comme en témoignent également les excrétas urinaires d'après les analyses faites par M. Berlioz.

4° Les applications thérapeutiques générales qui découlent de cette action physiologiques se sont trouvées réalisées par la clinique.

Elles portent aujourd'hui sur un total de plus de *cent* malades, que le docteur Apostoli a soignés depuis un an et demi, tant à sa clinique que dans son cabinet.

La plus grande partie ont bénéficié très favorablement de cette nouvelle médication qui a été appliquée isolément et uniformément à l'exclusion absolue de toute influence parallèle soit d'un régime spécial, soit de toute autre médication additionnelle.

5° Ces courants exercent dans la plupart des cas une action puissante et généralement réparatrice sur les maladies dites par *ralentissement de la nutrition*, en accélérant les échanges organiques et en activant les combustions ralenties ou perverties, comme le prouve l'examen des urines fait par M. Berlioz, dont voici le résultat synthétique :

La diurèse devient généralement plus satisfaisante et les déchets organiques sont plus facilement éliminés.

Les combustions sont augmentées comme le démontre la diminution du chiffre de l'*acide urique*, en même temps que le taux de l'*urée* devient généralement plus élevé.

Le rapport entre ces deux substances qui, avant tout traitement, est souvent très fort, diminue peu à peu au point de se rapprocher du rapport moyen de 1/40.

L'élimination des éléments minéraux a été elle-même influencée, mais d'une manière beaucoup moins évidente.

6° On peut généralement constater sur tout malade soumis à leur influence, par des séances quotidiennes, qui durent quinze minutes chacune, les modifications suivantes de l'état général, classées par leur ordre d'apparition :

— Retour du sommeil ;

— Relèvement des forces et de l'énergie vitale ;

— Réapparition de la gaieté, de la résistance au travail et de la facilité pour la marche ;

— Amélioration de l'appétit, etc.

— Au total, *restauration complète et progressive de l'état général.*

Souvent dès les premières séances, et avant même toute influence locale apparente, ou toute action marquée sur la sécrétion urinaire, on peut nettement constater une amélioration de l'état général.

7° Les troubles locaux, douloureux ou trophiques, subissent généralement d'une façon beaucoup plus tardive l'influence modificatrice de ces mêmes courants, et, quelquefois même, ils restent réfractaires, pour une période plus ou moins longue, à leur action réparatice à distance, et exigent un complément de traitement local qui sera l'objet d'un autre prochain Mémoire.

8° Les maladies qui, jusqu'à présent, ont paru au docteur Apostoli *peu ou pas justiciables* de cette action thérapeutique, sont généralement celles qui n'ont pas de processus anatomique jusqu'ici bien défini ; en un mot, les maladies dites *sans lésions*, et dont le type principal est l'*hystérie*, et certaines formes de *neurasthénie*.

9° De toutes les maladies qui ont le plus bénéficié de cette action thérapeutique générale, c'est l'*arthritisme* (rhumatisme et goutte) qui paraît le plus énergiquement et le plus efficacement influencé.

10° Quelques malades *diabétiques* ont vu assez rapidement leur sucre disparaître sous cette influence, tandis que chez d'autres l'élimination du sucre n'a pas sensiblement diminué, malgré le relèvement manifeste et constant de l'état général.

La variation de ces résultats tient-elle à une imperfection de l'outillage électrique ou à un défaut de technique opératoire? C'est ce qu'un avenir prochain démontrera, quoique les origines et les sources multiples du diabète expliquent aisément la variation possible des résultats que l'on doit obtenir d'une thérapeutique uniforme.

11° En résumé, les courants de haute fréquence et de haute tension introduits en électrothérapie par M. d'Arsonval viennent d'agrandir considérablement le champ d'application de l'électricité médicale. — Ils constituent une acquisition nouvelle et précieuse pour la Médecine générale en mettant entre les mains des médecins une arme puissante capable de modifier plus ou moins profondément les phénomènes intimes de la nutrition.

« Les résultats que le docteur Apostoli a obtenus depuis cette époque déjà éloignée confirment ses premières conclusions ; ils sont même beaucoup plus accentués en substituant au solénoïde le procédé par condensation.

« Je poursuis de mon côté des essais, à la Maternité, qui confirment pleinement, chez les enfants, les résultats obtenus chez les adultes. Chez l'enfant à la mamelle, il est, en effet, on ne peut plus simple d'établir le bilan nutritif par la simple pesée, la composition de l'aliment restant invariable et il n'y a aucune part à faire à la suggestion.

« Je résumerai tous ces faits en disant que la haute fréquence est le plus puissant modificateur de la nutrition intime des tissus que nous connaissions.

« C'est un modificateur qui atteint la vie dans ses manifestations intimes et qui touche au fonctionnement de la cellule vivante elle-même. Son action s'étend même jusqu'aux produits de sécrétion de cette cellule, comme nous l'avons vu. Comme ces courants peuvent traverser impunément l'homme vivant, il est inutile d'insister sur les espérances que fait naître une pareille méthode. Il n'est donc pas téméraire de dire que les courants à haute fréquence ouvrent une voie entièrement nouvelle à la thérapeutique.

« C'est l'expression dont s'est servi, à l'Académie des Sciences, un savant dont c'est la conviction profonde. Ce savant n'est autre que mon confrère, le professeur Bouchard, dont les travaux sur la nutrition font autorité dans la science.

« Quel est le mécanisme de l'action physiologique et thérapeutique de ces courants ? Pourquoi leur innocuité absolue quand ils traversent l'organisme? Je

l'ignore. On a répondu à la seconde question en disant que ces courants ne pénétraient pas et s'écoulaient à la surface. C'est là une erreur qu'il est facile de réfuter. D'abord l'action sur les centres vaso-moteurs prouve la pénétration profonde de ces courants dans l'organisme. De plus, l'écoulement superficiel n'est vrai que pour les conducteurs métalliques. La pénétration est d'autant plus profonde que la résistance *spécifique* du conducteur est plus grande.

« Cette pénétration, d'après la formule bien connue des électriciens, est en raison directe de la racine carrée de la résistance spécifique et en raison inverse de la racine carrée de la fréquence.

« Or, si l'on applique le calcul au cas d'un conducteur cylindrique ayant la résistivité et les dimensions du corps humain, on voit que la répartition est sensiblement uniforme. J'ai vérifié d'ailleurs le fait directement sur un cylindre d'eau salée à 7 pour 1000, ayant la résistivité du corps humain, le courant ne variait pas d'un centième de sa valeur pris au centre ou à la périphérie du cylindre liquide.

« Si d'ailleurs le courant s'écoulait par l'épiderme, étant donnée sa résistivité très élevée, sa température dépasserait un millier de degrés quand le corps est traversé par un courant de 1 ampère seulement. L'hypothèse de l'écoulement superficiel, dans le cas du corps humain, est donc à la fois en contradiction avec l'expérience et avec la formule de Thomson. Cette hypothèse n'est d'ailleurs plus soutenue par aucun physicien à l'heure actuelle.

« Je voyais récemment, dans une publication médicale dont j'ai oublié le nom, un médecin distingué donner une explication très simple de l'action physio-

logique des hautes fréquences. Ces courants, disait-il, s'écoulent par la surface du corps, ils l'échauffent, et de là tous les effets observés. On obtiendrait les mêmes résultats, à moins de frais, pensait-il, en mettant le malade ou les tubes contenant les microbes dans une étuve. J'avoue que la fantaisie de cette théorie a désarmé ma critique.

« J'aurais pu répondre que dans une étuve chauffée les choses se passent précisément en sens contraire. Les combustions organiques, au lieu d'être augmentées, vont en s'abaissant. On use moins d'oxygène et l'on élimine moins d'acide carbonique dans les climats chauds que dans les climats froids. On brûle moins l'été que l'hiver. Mais ces faits sont si connus, même en dehors des médecins, que vous ne me pardonneriez pas d'insister.

« La raison qui fait que ces courants n'impressionnent pas les terminaisons nerveuses tient précisément à leur fréquence.

« Les nerfs sensitifs et moteurs sont organisés pour répondre à des fréquences déterminées. C'est ce que nous voyons, par exemple, pour le nerf optique dont les terminaisons sont aveugles pour les ondulations de l'éther d'une période *inférieure* à 497 billions par seconde (rouge) et *supérieure* à 728 billions (violet).

« Le nerf acoustique se comporte d'une façon analogue pour les vibrations sonores.

« Ces propriétés, qui étaient particulières à deux nerfs de sensibilité spéciale, comme le nerf optique et le nerf acoustique, doivent être étendues aux nerfs moteurs et aux nerfs de la sensibilité générale. Chaque ordre de nerfs obéit à des fréquences déterminées qui

ne sont pas les mêmes, par exemple, pour les nerfs musculaires que pour les nerfs vasculaires.

« Quoi qu'il en soit, le fait n'en existe pas moins et la haute fréquence constitue dès maintenant une arme puissante entre les mains du médecin qui a les connaissances voulues pour la manier. »

D'ARSONVAL.

DU CHOIX DES LOCALITÉS

COMME

CENTRES DE GROUPES TÉLÉPHONIQUES

INTERURBAINS

Pour déterminer le centre d'un groupe téléphonique on est généralement guidé par l'importance relative de chacune des localités du groupe au point de vue du service télégraphique.

Souvent telle localité s'impose de toute évidence, avant la moindre recherche.

Lorsqu'il n'en est pas ainsi, lorsque dans la plus simple hypothèse le choix est circonscrit entre deux villes, il convient d'apprécier quelle est celle des deux qui, dans la suite, provoquera le plus grand nombre de communications interurbaines. Si l'on place le centre du groupe dans celle-là, on arrivera à la plus grande rapidité dans le service et on réalisera les communications les meilleures, car on réduira ainsi au minimum le nombre des intermédiaires dans l'établissement de ces communications.

Il n'est pas nécessaire d'insister sur l'importance de cette considération qui est prédominante dans l'organisation du service téléphonique.

Certaines autres raisons d'ordre technique peuvent faire pencher la balance en faveur de telle ou telle localité dans le *seul* cas où la première considération ne permettrait pas de faire un choix.

Quant aux autres considérations, elles me paraissent moins que secondaires, pour un service à l'exécution duquel le public participe dans une large mesure, et dont il reconnaît vite les défauts d'organisation.

Prenons comme exemple le cas du groupe téléphonique de *Cette*. Il comprenait, à l'origine, les cinq villes de Narbonne, Béziers, Cette, Montpellier et Nîmes, en suivant dans cette énumération l'ordre des localités de l'ouest à l'est.

Les deux villes entre lesquelles on devait opter étaient Montpellier et Cette.

Le poste de Cette se trouve à peu près à égale distance de Béziers et Montpellier d'une part, de Narbonne et Nîmes d'autre part. Ce n'était certes pas une raison suffisante, bien qu'elle eût sa valeur, pour y placer le centre du groupe. Il fallait déterminer et choisir le poste de plus grande importance au point de vue de l'exploitation interurbaine. Un examen attentif des transmissions télégraphiques *à pleine taxe* indiqua que le choix devait se porter sur Cette. Le relevé comparatif ci-après des transactions téléphoniques des deux villes considérées en fournit, *a posteriori*, la preuve frappante.

L'activité relativement considérable des communications à Cette, choisie comme centre du groupe dès l'origine, fut d'ailleurs bientôt accrue par l'ouverture des lignes de Marseille à Cette, puis de Toulouse, Bordeaux et Avignon à Cette.

Du relevé qui a été fait il résulte que les conversations interurbaines de ou pour Cette dépassent notablement les conversations de ou pour Montpellier;

que l'installation à Cette du centre du groupe a permis de réduire au minimum le nombre des intermédiaires dans l'établissement des communications, alors que le choix de Montpellier aurait eu, au contraire, pour effet de l'accroître considérablement, c'est-à-dire d'amoindrir le service comme rapidité et comme qualité de l'exécution.

Dans la comparaison du nombre des communications, pour l'objet qui nous occupe, il n'y a pas naturellement à tenir compte des conversations échangées entre les deux villes considérées; car si l'on déplaçait le centre téléphonique de l'une à l'autre, ces communications exclusives à la ligne Cette-Montpellier ne subiraient aucune modification quant aux postes intervenant dans les liaisons électriques.

Néanmoins, il n'est pas superflu d'observer que si l'on tenait compte de ces communications l'avantage en faveur de Cette n'en serait que plus marqué.

Ceci posé, voici dans quelles proportions les conversations interurbaines de ou pour Cette dépassaient celles de ou pour Montpellier :

En Mai 1897, de	25	p. 100.
Juin	26	—
Juillet	54	—
Août	73	—
Septembre	143	—
Octobre	84	—
Novembre	93	—
Décembre	74	—
Janvier 1898	67	—
Février	62	—
Mars	77	—
Avril	66	—
Mai	79	—

La moyenne des douze derniers mois est de 75 p. 100 et la moyenne annuelle suit une progression ascendante.

L'interprétation de cette différence de 75 p. 100 en faveur de Cette nous indique immédiatement que, pour les conversations dont il s'agit, sur quatre communications demandées et réalisées, trois concernent Cette et une seule concerne Montpellier.

Par suite, si le Central interurbain se trouvait à Montpellier au lieu d'être à Cette, la réalisation de ces communications exigerait, *trois fois sur quatre*, un intermédiaire de plus; et comme les conversations de l'espèce représentent environ la moitié de l'ensemble de toutes les conversations échangées, on voit que, avec le centre du groupe à Montpellier, sur huit communications données, trois exigeraient un intermédiaire de plus.

Si de la moyenne nous passons au cas extrême du mois de septembre 1897, nous voyons que sur l'ensemble de toutes les communications Montpellier, comme Central, aurait exigé, sept fois sur dix, l'intervention, qui *est évitée à Cette*, d'un poste supplémentaire.

Il est à peine besoin d'insister sur l'importance capitale de ces considérations pour le service téléphonique où l'on cherche à éliminer les intermédiaires non indispensables qui constituent toujours une chance d'erreur, et à réduire à son extrême limite le temps perdu dans la réalisation des communications demandées. Ce temps est d'autant plus précieux que les demandes, on le sait, sont loin d'être uniformément réparties sur l'ensemble de la journée, et que, tout au contraire, elles affluent à certaines heures; que la

personne ayant formulé la demande en attend l'exécution, et qu'il n'est pas possible de lui dissimuler les pertes de temps.

La petite statistique que j'ai donnée ci-dessus montre, si l'on compare 1897 à 1898, que l'excédent, toujours en faveur de Cette, suit un mouvement continuellement ascendant.

Les oscillations ne sont que momentanées.

L'excédent considérable de septembre s'explique par le voisinage de la récolte, et donne la mesure de la différence du mouvement commercial des deux villes.

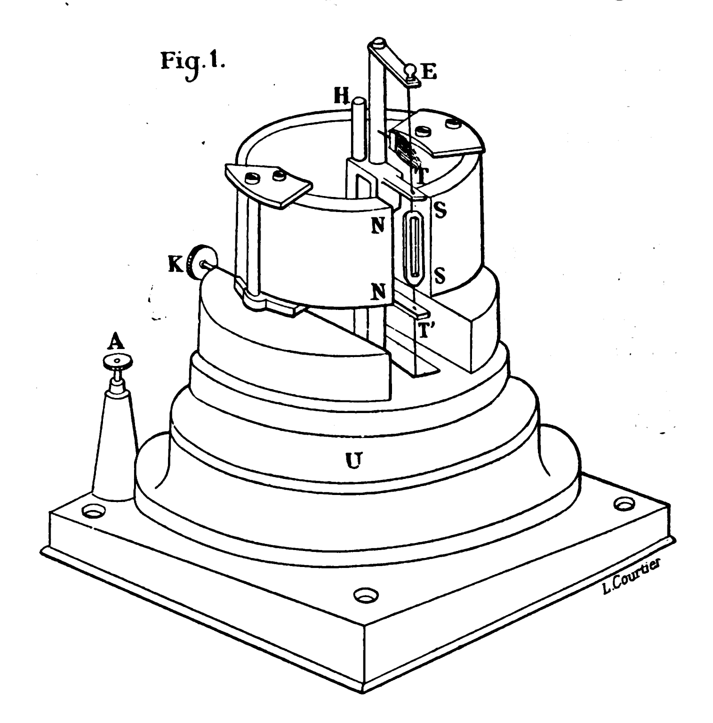
Il n'est pas sans utilité de rappeler que les indications qui servirent de base aux premières études de l'organisation du groupe téléphonique de Cette furent extraites des statistiques télégraphiques; peut-être, dans le même ordre d'idées, les communications télégraphiques elles-mêmes auraient-elles pu bénéficier de l'enseignement qui s'en dégageait. En tout cas on voit le parti qu'on en peut tirer pour faire du téléphone une exploitation réellement commerciale et répondant à l'intérêt général.

M. Cailho.

NOTE

SUR LE GALVANOMÈTRE SULLIVAN

Ayant eu l'occasion, pendant l'une des campagnes de pose du nouveau câble transatlantique français, de suivre des essais électriques effectués avec un galva-

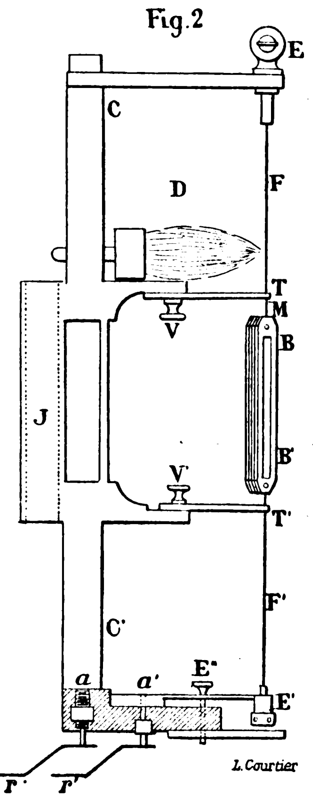


nomètre Sullivan et ayant pu constater les services qu'il est susceptible de rendre par les plus forts roulis, nous avons pensé qu'une description de cet appareil

serait de quelque intérêt pour les lecteurs des *Annales*.

Le galvanomètre Sullivan est une modification du galvanomètre Deprez-d'Arsonval.

La bobine BB′, très étroite, longue et très légère, sans noyau, est placée entre les pôles très rapprochés d'un aimant permanent de forme cylindrique NS (*fig.* 1) fixé solidement sur le socle en bois U de l'appareil. Elle porte, à la partie supérieure, un miroir M collé sur sa face antérieure. De plus, deux petits fils en plomb PP′ sont rivés, à sa base, l'un sur la face antérieure, l'autre sur la face postérieure (*fig.* 3).



Cette bobine est soutenue et maintenue par deux fils méplats FF′, en bronze phosphoreux, qui traversent librement les pièces métalliques VT, V′T′, en passant dans deux petits trous T et T′ (*fig.* 2) percés aux extrémités de ces pièces.

Les fils de suspension F et F′ sont en relation avec les extrémités de la bobine et peuvent être plus ou moins tendus au moyen des dispositifs EE″ faisant partie d'un cadre en cuivre CC′. L'écrou E′ sert à détordre, au besoin,

les fils F et F′. A la base du cadre CC′ se trouvent, en outre, deux bornes en platine *aa′* isolées l'une de l'autre et communiquant, d'une manière permanente, la première avec le fil F, la seconde avec F′.

Le cadre CC′ présente, en J, une partie tubulaire qui s'adapte sur la tige métallique verticale H montée sur une pièce mobile établie sur le socle U. Cette dernière est commandée, d'avant en arrière, par la vis K. On peut donc, à l'aide de cette vis, déplacer le cadre tout entier et, par suite, modifier la position de la bobine dans le champ de l'aimant NS. La sensibilité du galvanomètre qui dépend de cette position en même temps que de la tension des fils FF′ est susceptible de varier ainsi entre des limites assez étendues.

Fig. 3.

Lorsque le cadre CC′ est en place, les pointes *aa′* sont en contact avec deux ressorts *rr′* reliés aux bornes AA′ de l'instrument.

Pour utiliser cet appareil sur un bateau, il convient de le placer de manière que le plan NSSN soit dirigé suivant le plan médian passant par le grand axe du navire. De plus, les petites masses en plomb P et P′ qui peuvent être éloignées ou rapprochées des faces de la bobine, doivent être disposées de façon que le centre de gravité de celle-ci reste toujours sensiblement sur l'axe de suspension FF′, pendant les mouvements du bateau. Cette opération, qu'on exécute en imprimant au galvanomètre des déplacements analogues à ceux produits par le roulis, porte le nom de « balancement ».

L'instrument est protégé contre les actions magnétiques extérieures par un couvercle en fer doux.

Une brosse en poils de chameau représentée en D (*fig.* 2) est réglable dans le plan du cadre CC′ qui la porte de telle sorte qu'elle puisse venir frotter avec plus ou moins d'intensité sur la partie supérieure F de la suspension. Pour une certaine valeur de ce frottement, le galvanomètre peut être employé comme récepteur à miroir.

Pour donner une idée de la sensibilité maximum, nous ajouterons qu'avec un Sullivan bien réglé et convenablement balancé, présentant une résistance de 830 à 840 ohms, la déviation obtenue, sur une échelle placée à 1 mètre, avec un courant de 1 microampère, égale environ 20 millimètres.

C. JAULIN.

NOUVELLE

DÉMONSTRATION DU THÉORÈME DE STOKES (*)



On donne communément le nom de *Théorème de Stokes* à la proposition qui exprime la transformation d'une intégrale prise le long d'un contour fermé sur une intégrale prise sur une surface limitée à ce contour. M. Em. Picard fait toutefois remarquer avec raison que cette proposition était déjà connue d'Ampère, du moins dans des cas particuliers.

Il existe plusieurs démonstrations irréprochables de ce théorème; si je propose la suivante, c'est parce qu'elle me semble particulièrement simple et qu'on y voit l'intégrale superficielle naître, pour ainsi dire, de l'intégrale curviligne.

Étant donné un contour fermé quelconque C, qu'un mobile parcourt dans un sens choisi arbitrairement et une surface quelconque S limitée à ce contour, nous appellerons face positive de S celle qui est telle qu'un personnage debout sur cette face, près du contour, voit le mobile qui parcourt C aller de sa droite vers sa gauche.

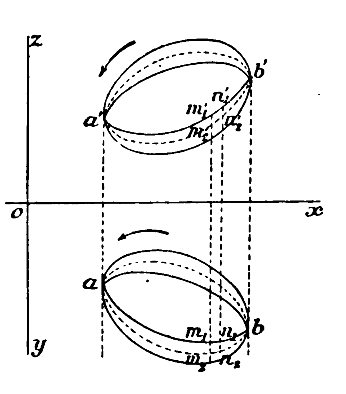
Soit P une fonction des coordonnées x, y, z supposées rectangulaires. Considérons l'intégrale $\int P dx$

(*) *Nouvelles Annales de mathématiques*, 3e série, t. XVI.

prise dans le sens de la circulation du mobile, et étendue à tout le contour C. Nous nous proposons de transformer cette intégrale curviligne en une intégrale superficielle prise sur S.

Figurons les projections de C d'après les conventions de la géométrie descriptive, en prenant le plan X O Z pour plan vertical, le plan X O Y pour plan horizontal supposé rabattu sur le plan vertical.

Soit A le point de C le plus rapproché, et B le point de C le plus éloigné du plan Y O Z. Par ces deux points, traçons sur S une ligne simple quelconque, puis imaginons que cette ligne se dédouble, de façon à former un contour fermé limité aux points A et B et toujours situé sur la surface S et que ce contour fermé s'ouvre progressivement de façon à venir finalement coïncider avec C.



Soient maintenant C_1 et C_2 deux états infiniment voisins du contour variable; nous allons évaluer la variation éprouvée par $\int P dx$ lorsque le contour variable éprouve cette transformation infiniment petite. Pour cela, menons, parallèlement à Y O Z, une série de plans infiniment rapprochés ; à chaque élément $M_1 N_1$ ainsi découpé sur C_1 correspond un élément $M_2 N_2$ découpé sur C_2 et ayant la même projection dx. Lorsqu'on passe de C_1 à C_2 un élément $P dx$ d'intégrale se transforme en un autre où dx est le même et où P seul a varié, à cause de la variation de l'y et de z

du milieu de l'élément de contour; en appelant δy et δz ces variations, celle de P est

$$\frac{\partial P}{\partial y}\delta y + \frac{\partial P}{\partial z}\delta z,$$

et celle de $\int P\,dx$ est

$$\int_{c_1} \frac{\partial P}{\partial y}\delta y\,dx + \frac{\partial P}{\partial z}\delta x\,dx.$$

Mais $\delta y\,dx$ est la projection sur le plan xoy du quadrilatère infiniment petit $M_1\,M_2\,N_2\,N_1$; désignons cette projection par ω_z. De même, $\delta z\,dx$ est la projection prise en signe contraire du même quadrilatère sur le plan xoz; désignons-la par ω_y. La variation précédente peut alors s'écrire :

$$\int \frac{\partial P}{\partial y}\omega_z - \frac{\partial P}{\partial z}\omega_y;$$

elle est ainsi exprimée par une intégrale de surface s'étendant à tous les éléments de la bande infiniment étroite balayée par le contour variable.

Lorsque, maintenant, ce contour variable passera d'un état initial dans lequel il embrasse sur S une aire nulle à un état final dans lequel il coïncide avec C, la somme des variations éprouvées par $\int P dx$ sera précisément la valeur de $\int_c P dx$, puisque, dans l'état initial considéré, l'intégrale est identiquement nulle. On a donc

$$\int_c P dx = \int_S \frac{\partial P}{\partial y}\omega_z - \frac{\partial P}{\partial z}\omega_y;$$

l'intégrale du second membre s'étendant à tous les éléments de toutes les bandes successivement balayées, c'est-à-dire à tous les éléments de S.

Remarquons que, cette dernière intégrale étant indépendante du mode de division de S en éléments infiniment petits, il s'ensuit que ω_y et ω_z peuvent être envisagées comme les projections d'un élément à surface de forme quelconque pris sur S.

Si l'on désigne par P, Q, R trois fonctions quelconques de $x\, y\, z$, on a, d'après ce qui précède,

$$\int_c \mathrm{P}dx = \int_{\mathrm{S}} \frac{\partial \mathrm{P}}{\partial y}\,\omega_z - \frac{\partial \mathrm{P}}{\partial z}\,\omega_y,$$
$$\int_c \mathrm{Q}dy = \int_{\mathrm{S}} \frac{\partial \mathrm{Q}}{\partial z}\,\omega_x - \frac{\partial \mathrm{Q}}{\partial x}\,\omega_z,$$
$$\int_c \mathrm{R}dz = \int_{\mathrm{S}} \frac{\partial \mathrm{R}}{\partial x}\,\omega_y - \frac{\partial \mathrm{R}}{\partial y}\,\omega_x.$$

En ajoutant membre à membre, il vient

$$\int_c \mathrm{P}dx + \mathrm{Q}dy + \mathrm{R}dz = \int_{\mathrm{S}} \left(\frac{\partial \mathrm{Q}}{\partial z} - \frac{\partial \mathrm{R}}{\partial y}\right)\omega_x + \left(\frac{\partial \mathrm{R}}{\partial x} - \frac{\partial \mathrm{P}}{\partial z}\right)\omega_y + \left(\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial y} - \frac{\partial \mathrm{Q}}{\partial x}\right)\omega_z;$$

c'est le théorème de Stokes; ω_x, ω_y, ω_z sont définies comme les produits à l'élément ω pris sur la surface S par les cosinus des angles formés par les sens positifs des trois arcs avec la normale à S mené du côté de la face positive, définie par le sens de l'intégration le long du contour.

R. BLONDLOT.

LES RADIATIONS DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE

par A.-A. MICHELSON, de l'Université de Chicago.

L'analyse approfondie des radiations émises dans un champ magnétique montre que les phénomènes sont beaucoup plus complexes qu'on ne l'avait supposé. Un examen des composantes individuelles du « triplet » met en évidence le fait qu'en général ce sont des lignes multiples. On peut résumer les lois comme suit :

A

1. Toutes les raies spectrales deviennent triples quand les radiations sont créées dans un champ magnétique.

2. La séparation est proportionnelle à l'intensité du champ et est approximativement la même pour toutes les couleurs et pour toutes les substances.

3. Vues dans un plan perpendiculaire au champ magnétique, les raies extérieures sont polarisées parallèlement au champ et la raie centrale perpendiculairement au champ.

4. Vues dans la direction des lignes de force, la raie centrale s'évanouit, tandis que les raies extérieures sont polarisées circulairement, la composante de plus courte longueur d'onde est polarisée dans la direction du courant magnétisant. l'autre l'est en sens opposé.



A ces lois (qui ont été vérifiées par l'examen de plus d'une douzaine de raies), il faut ajouter les suivantes :

B

1. La « raie médiane » est un triplet symétrique ; la distance entre les composantes étant le quart de la distance des raies extérieures, est par conséquent proportionnelle à l'intensité du champ.

2. L'intensité relative des composantes varie pour les différentes substances et pour les différentes raies de la même substance ; et, en conséquence, le groupe peut apparaître comme une simple raie ou comme une raie double ou triple.

3. Les raies extérieures ne sont pas symétriques, mais elles sont symétriquement placées par rapport à la raie centrale. La distance entre les composantes est ordinairement un quart de celle entre les raies extérieures, mais elle en est, dans quelques cas, le sixième.

4. L'intensité des composantes varie pour les différentes raies spectrales et ces variations ne correspondent pas toujours avec celles de la ligne centrale. Les groupes extérieurs, en conséquence, peuvent apparaître comme des raies simples, doubles, triples ou multiples.

La *fig.* 1 représente le plan d'installation de l'appareil employé à ces recherches. S est la source de lumière, soit un petit chalumeau à main avec un globule de la substance à examiner dans la flamme, soit un tube à vide qu'on place d'ordinaire dans une boîte métallique pour le chauffer, la forme de cette étuve

permet de l'approcher tout près des pièces polaires P d'un électro-aimant. L'un des pôles est percé de part en part pour permettre d'examiner les rayons dans l'axe. La lumière de S subit une préalable dispersion dans le système spectroscopique formé par deux prismes de CS^2, la radiation soumise aux investigations étant isolée par le diaphragme *s*. Elle entre

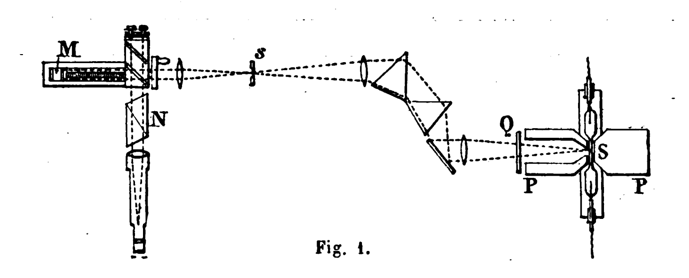


Fig. 1.

alors dans l'appareil de mesure interférentiel, dont l'un des miroirs M se déplace dans un guidage si bien établi qu'aucun réglage n'est nécessaire en aucun point de sa course, c'est-à-dire que ce miroir reste parallèle à lui-même d'une façon si approchée que les franges d'interférence, qui sont des cercles concentriques, sont toujours aussi nettes que possible. Le rayon émergent passe alors dans l'analyseur N, et va dans la lunette d'observation.

La netteté de visibilité des franges d'interférence est estimée pour des positions du miroir M correspondant à des différences de marche de 1, 2 ou 5 millimètres, suivant la nature de la courbe. Ceci, il faut l'admettre, laisse beaucoup à désirer en précision et dans quelques cas il a fallu des corrections de 20 p. 100 pour réduire les observations à leur vraie valeur, soit $V = (I_1 - I_2) : (I_1 + I_2)$, où I_1 est le maximum de l'intensité et I_2 le minimum pour deux franges adja-

centes. Des lectures sans doute bien plus exactes pourraient être obtenues en employant des franges de comparaison (cf. *Phil. Mag.*, sept. 1892), mais le procédé est d'autant plus pénible que la forme de la courbe est sujette à se modifier pendant la durée des observations. Le cas est un peu analogue à celui de l'estimation à l'œil nu des clartés d'étoiles, procédé bien inférieur aux déterminations photométriques et beaucoup moins incommode.

En tous cas, il est toujours facile de distinguer les montées et les descentes et les maxima et minima peuvent être localisés avec une grande exactitude et cela est d'ordinaire tout à fait suffisant pour permettre une déduction d'une exactitude passable concernant la distribution de la lumière dans le spectre. J'ai montré (*Phil. Mag.*, sept. 1892) qu'avec la définition de la visibilité que j'ai donnée, si $y = \Phi(x)$ est la courbe d'intensité du spectre, on a :

$$PV = \sqrt{C^2 + S^2},$$

avec :

$$P = \int \Phi(x) dx, \qquad C = \int \Phi(x) \cos kx dx$$

$$\text{et} \qquad S = \int \Phi(x) \sin kx dx,$$

l'intégration étant étendue au spectre entier.

Mais on a, par la formule de Fourier :

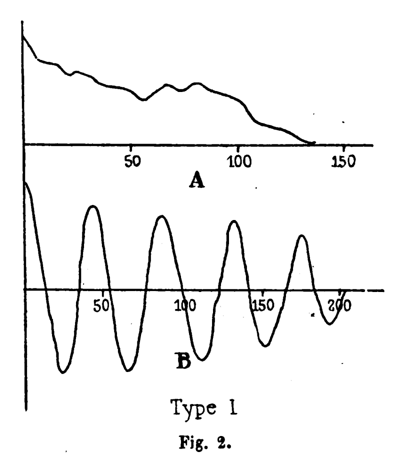
$$\Phi(x) = \int_0^\infty C \cos kx dk + \int_0^\infty S \sin kx dk,$$

de sorte que si C et S sont tous les deux connus, $\Phi(x)$ peut être déterminé. Ce n'est pas le cas, en général, à moins qu'on ne donne une autre relation entre C et S. Cette autre relation est fournie par la

« courbe de phase » qui donne le déplacement des franges à partir de la position qu'elles occuperaient si la source avait été homogène. Si δ est le déplacement et $\theta = 2\pi\delta/d$, alors on a :

$$C = V\cos\theta \quad \text{et} \quad S = V\sin\theta.$$

En général, la courbe en θ est mal commode à observer en raison de la difficulté de s'assurer d'une source de comparaison suffisamment homogène, mais, dans le cas présent, celle-ci est fournie par les radiations non magnétisées (celle-ci n'est pas toujours suffisamment simple, comme dans le cas de la raie verte du thallium). D'ordinaire, cependant, on faisait l'hypothèse que le spectre était symétrique et la solution n'était vérifiée que dans quelques cas peu nombreux par l'analyse complète. Sous cette forme simple, nous avons :



Type I

Fig. 2.

$$\Phi(x) = \int_0^\infty V \cos kx dk.$$

Cette intégrale peut souvent être calculée quand V peut être exprimé sous une forme analytique simple en fonction de k. Ce n'est pas le cas en général et ce fut pour la solution de problèmes de ce genre que l'analyseur harmonique fut imaginé (*Phil. Mag.*, janv. 1898). La courbe $V = f(k)$ est servie à la machine qui trace alors la courbe $y = \Phi(x)$, toute l'opération ne durant que quelques minutes (*fig.* 2).

On a trouvé en complétant l'analyse de plus d'une cinquantaine de courbes de « visibilité » que les spectres résultants peuvent être classés en trois catégories ; il y a bien quelques variations intéressantes qui mériteraient une étude à part, mais la plupart des cas peuvent être identifiés à première vue avec nos cas types.

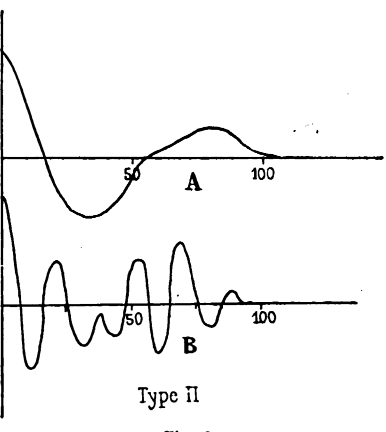


Fig. 3.

Les trois types de la courbe de visibilité sont données dans les *fig.* 2, 3 et 4. Celle marquée A se rapporte aux observations faites dans un plan d'observation à angle droit avec le champ magnétique et avec le plan de polarisation perpendiculaire aux lignes de force ; tandis que B correspond aux observations dans un plan toujours normal au champ, mais le plan de polarisation étant parallèle aux lignes de force.

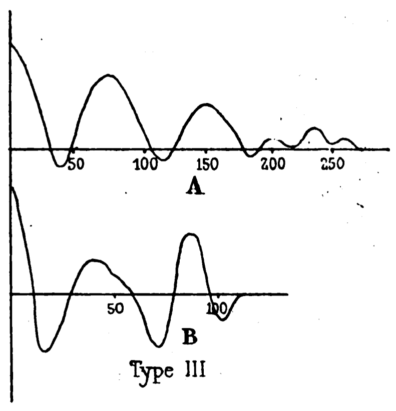


Fig. 4.

On a trouvé qu'il n'y avait pas de différence appré-

ciable entre ces dernières et les observations dans un plan parallèle au champ; mais dans ce cas, il était possible d'analyser les deux groupes séparément au moyen d'une lame quart d'onde θ (*fig.* 1). Ceci fut fait dans quelques cas, mais sans donner de nouveaux resultats.

Les abscisses des courbes de visibilité sont les différences de marche en millimètres, ramenées au champ d'intensité 10.000, déterminé par une spirale de bismuth. La *fig.* 5 donne les courbes d'intensité

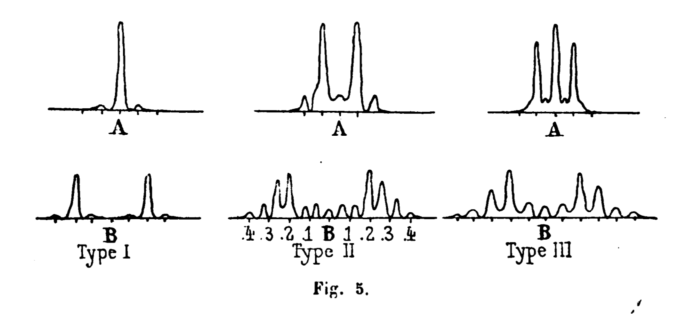


Fig. 5.

des spectres correspondants, les abscisses étant en décimètres (pour cela, les abscisses des courbes tracées par l'analyseur étaient multipliées par le carré de la longueur d'onde). Le tableau ci-après est une liste des radiations et leur classification.

Mercure . . .	raies jaunes. . . .	type	I
— . . .	raie verte.	—	III
— . . .	raie violette. . . .	—	II
Cadmium . .	raie rouge.	—	I
— . .	raie verte.	—	III
— . .	raie bleue.	—	II
Zinc	raie rouge.	—	I
—	raie verte.	—	III
—	raie bleue.	—	II
Sodium . . .	raie jaune.	—	II

Thallium. . .	raie verte.	type	II (incertain)
Lithium . . .	raie rouge	—	élargie
Hydrogène. .	raie rouge	—	élargie
— . .	raie bleue.	—	élargie
Hélium. . . .	raie jaune.	—	élargie
—	raie verte.	—	élargie

La table suivante montre que la loi A-2 n'est qu'approximativement vraie. En fait, eu égard à la complexité des spectres, il y a une latitude considérable dans le choix de la distance entre les groupes extrêmes. Si elle correspond aux composantes les plus brillantes, on peut à peine dire que la loi se vérifie; mais s'il faut prendre la distance entre les centres de gravité des aires lumineuses, on trouve accord en gros. La table ci-après donne la séparation en 10^{-10} m. pour un champ de 10.000. Les raies marquées d'une astérisque sont moins exactes que les autres par suite de l'élargissement.

*Hydrogène. . . .	rouge.	0,48
*Lithium.	rouge.	0,60
Cadmium. . . .	rouge.	0,42
Zinc.	rouge.	0,42
Mercure.	jaune.	0,36
*Sodium.	jaune.	0,50
*Hélium.	vert.	0,37
Mercure.	vert.	0,40
Cadmium. . . .	vert.	0,41
Zinc.	vert.	0,40
*Thallium. . . .	vert.	0,36
Cadmium. . . .	bleu.	0,40
Zinc.	bleu.	0,33
Mercure.	violet.	0,33

En tenant compte de l'incertitude signalée, les résultats montrent dans leur ensemble un accord en gros, dont on peut conclure que la séparation est

indépendante de la substance qui émet la radiation et de la couleur.

Il est possible que les similitudes observées dans la table soient dues à la parenté chimique des substances et peut-être est-il peu justifié de généraliser d'après un nombre si limité de corps observés, et il peut bien se faire que les éléments pris sur une plus large échelle offrent d'autres particularités.

Je désire rendre hommage cordialement à l'aide efficace qui m'a été prêtée pour ce travail par M. C.-R. Mann et reconnaître en particulier la patience et l'habileté qu'il a montrée dans les manipulations longues et délicates de la préparation des tubes à vide, auxquelles le succès de ces recherches est dû en grande partie.

(*Ryerson Physical Laboratory*, janv. 1898.)



CHRONIQUE.



Influence de la trempe sur la résistance électrique de l'acier.

Par M. H. Le Chatelier (*).

Dans des recherches antérieures (**) j'ai montré que la résistance électrique de l'acier à 0,85 p. 100 de carbone prenait, après trempe à 750°, une valeur une fois et demie plus grande. M. Barus, par contre, a trouvé (***) que pour les aciers durs cette résistance pouvait plus que tripler, mais il ne donne ni la composition des aciers étudiés, ni la température de trempe; il indique seulement leur provenance. Il y avait entre ces résultats un désaccord tel que de nouvelles expériences étaient nécessaires.

Je dirai, de suite, que des aciers de même provenance que ceux de M. Barus m'ont donné une teneur en carbone de 1,16 p. 100, c'est-à-dire notablement supérieure à celle des aciers que j'avais employés. J'ai reconnu que trempés à 950° ils prenaient, en effet, une résistance triple. Je n'avais pas, dans mes premières recherches, dépassé la température de 750° qui est celle employée dans l'industrie pour les aciers durs à outils; leur qualité est d'autant meilleure que la trempe a été faite à plus basse température.

Influence de la température de trempe. — Le premier point à élucider était l'influence de la température de trempe;

(*) *Comptes rendus*, t. CXXVI, p. 1782, séance du 20 juin.
(**) *Comptes rendus*, t. CXII, p. 40; 1891.
(***) *U. S. geological Survey*, t. XIV, p. 20; 1885.

voici deux séries d'expériences relatives à des aciers à 0,84 et 1,13 p. 100 de carbone :

Acier à 0,84 *de carbone. — Résistance à* 15° = 16.

Température.......	710°	740°	810°	850°	1000°
$\frac{\text{R. après trempe}}{\text{R. avant trempe}}$.....	1	1,3	2,1	2,2	2,2

Acier à 1,13 *de carbone. — Résistance à* 15° = 18.

Température.......	710°	740°	810°	850°	950°
$\frac{\text{R. après trempe}}{\text{R. avant trempe}}$.....	1	1,3	1,6	2,1	3

Ces résultats montrent d'abord que la trempe ne modifie la résistance électrique de l'acier que si elle a été effectuée au-dessus de la température de récalescence (710°); c'est donc la même condition que pour le changement des propriétés mécaniques. La résistance électrique croît ensuite avec la température de trempe jusqu'à une valeur d'autant plus élevée que l'acier est plus riche en carbone. L'accroissement de résistance que le fer éprouve par la présence du carbone de trempe est en moyenne de 45 microhms par 1 p. 100 en poids de carbone, ou de 7 microhms par 1 atome p. 100 du même corps. C'est précisément l'accroissement que j'ai trouvé précédemment pour le silicium.

On sait, par les recherches de M. Osmond, que le carbone de trempe est réparti d'une façon homogène dans le métal, l'acier trempé étant une véritable solution solide de carbure de fer Fe^3C dans le fer en excès. Cette influence du mélange homogène sur la résistance électrique paraît générale; les impuretés qui, à l'état de traces, augmentent parfois tellement la résistance de certains autres métaux, s'y trouvent également à l'état de solution solide ou de mélange isomorphe, telles les traces d'argent dans le cuivre, ou de cuivre dans l'argent.

Influence de la présence de corps autres que le carbone. — Je donnerai seulement ici deux séries de mesures faites l'une sur des aciers au tungstène et l'autre sur des aciers au chrome.

Aciers au tungstène (*).

	Composition chimique.			
	I.	II.	III.	IV.
Carbone	0,6	0,55	0,76	1,11
Tungstène	5,0	2,9	2,7	2,7
Silicium	0,02	0,2	0,3	0,32
Manganèse	0,3	0,4	0,44	0,38
Résistance à 15°	21,0	18,0	18,5	20,0

Rapport des résistances après et avant trempe.							
I.		II.		III.		IV.	
760°	1,0	750°	1,2	730°	1,4	720°	1,0
800°	1,4	800°	1,4	780°	1,6	730°	1,3
850°	1,5	1100°	1,8	850°	1,7	850°	1,4
1100°	1,8	»		1100°	2,0	1100°	2,2

Aciers au chrome.

	Composition chimique.		
	I.	II.	III.
Carbone	0,5	0,82	1,07
Chrome	2,5	2,8	2,4
Silicium	0,27	0,27	0,36
Manganèse	0,23	0,21	0,21
Résistance à 15°	19,5	21,5	24,0

Rapport des résistances après et avant trempe.					
I.		II.		III.	
740°	1,0	780°	1,3	730°	1,3
800°	1,3	1100°	3,1	850°	1,5
820°	1,5	»		1100°	3,0
1100°	2,1	»		»	

On remarquera combien sont différentes l'influence du tungstène et celle du chrome. Aux températures élevées, ce

(*) Un acier à 7 p. 100 de tungstène, employé pour la fabrication de certains outils de tour qui ne sont pas trempés, a présenté une résistance spécifique de 24,5 microhms, et, après trempe à 800°, de 35,50 microhms.

dernier métal exagère l'accroissement de résistance qu'aurait produit la trempe sur un acier au carbone seul, tandis que le tungstène la diminue. On est conduit à penser que le chrome, métal analogue au fer, reste après la trempe, au moins en partie, à l'état de mélange isomorphe comme le font en tout état le nickel et le manganèse. Rien de semblable ne se produit avec le tungstène dont les composés doivent, aussi bien avant qu'après trempe, rester isolés dans la masse.

L'Éditeur-Gérant : Vve Ch. Dunod.

38 142. — Imprimerie Lahure, 9, rue de Fleurus

ANNALES TÉLÉGRAPHIQUES

Année 1898. Juillet-Août

SYSTÈME DE TÉLÉGRAPHIE MULTIPLE RÉVERSIBLE OU MULTIPLEX

INTRODUCTION HISTORIQUE.

Les principes et l'ensemble de ce système, destine à réaliser plusieurs transmissions télégraphiques sur le même fil, ont été décrits dans les numéros de mai et juin 1891, des *Annales télégraphiques*.

La description comprenait : 1° *le récepteur monotéléphonique*, ou *monotéléphone*, base essentielle du système; car sur les diverses espèces de vibrations électriques rythmées de périodes différentes qui le traversent simultanément, il permet d'en isoler une, de la renforcer, et de la recevoir dans des tubes adaptés aux oreilles, à l'exclusion de toutes les autres; 2° plusieurs modes de transmetteurs : les uns fondés sur les principes de la radiophonie; un autre dit *transmetteur télémicrophonique*, basé sur la transmission à

un microphone ordinaire des vibrations d'un électro-diapason.

Un ensemble formé de 4 transmetteurs de ce genre et de 4 monotéléphones avait figuré à l'Exposition Universelle de Paris, en 1889.

Le système, réduit ainsi aux éléments compris dans la description, ne pouvait laisser aucun doute sur la réalisation possible de plusieurs transmissions simultanées *dans un sens*, sur le même fil : et les expériences faites depuis 1881 sur quelques lignes aériennes et souterraines pour essayer les divers éléments du système avaient confirmé cette conclusion.

Mais le croisement en sens contraire de plusieurs transmissions d'un côté, et de plusieurs transmissions de l'autre, incontestable au point de vue théorique, comme conséquence du principe de mécanique dit *des petits mouvements*, pouvait paraître douteux aux techniciens au point de vue pratique.

En effet, dans la description donnée, tous les éléments du système, transmetteurs, ligne, récepteurs, étaient embrochés les uns à la suite des autres; de telle sorte que toutes les transmissions étaient reçues dans les monotéléphones du poste transmetteur, avant même d'arriver par la ligne aux monotéléphones du poste récepteur, et avec une intensité très différente, très grande dans les premiers, plus ou moins faibles dans les seconds, par suite de l'affaiblissement dû à la propagation sur la ligne.

Si la *monophonie* des monotéléphones était *parfaite*, c'est-à-dire si chaque monotéléphone accordé sur un son bien déterminé, *sol* par exemple, restait *absolument insensible* à l'action de courants électriques vibrants d'une période égale à celle des sons

voisins du sol, tels que *fa* dièze et *sol* dièze, et cela *quelle que soit l'intensité* des courants, le dispositif décrit n'aurait en pratique aucun inconvénient, et il aurait l'avantage d'une extrême simplicité.

Mais le principe mécanique du croisement sans confusion des petits mouvements suppose essentiellement que l'amplitude de ces mouvements soit très petite : en second lieu, la réalisation de la monophonie en acoustique, dans les appareils appelés *Résonateurs* (analogues vis-à-vis des vibrations aériennes aux monotéléphones vis-à-vis des courants électriques ondulatoires), ne s'opère réellement que si l'intensité des sons reçus dans les résonateurs est faible. Il était permis, en jugeant par analogie, de penser qu'il en devait être de même pour les monotéléphones et les courants électriques ondulatoires.

L'expérience montre qu'effectivement il en est ainsi : dans les monotéléphones, la monophonie n'est jamais absolue : quand l'un d'eux reçoit simultanément plusieurs systèmes de courants ondulatoires, dont l'un correspond exactement à sa période, celui-ci est bien isolé des autres, mais seulement en ce sens que l'intensité de ses effets et du son qui en résulte dans l'appareil est de 50 à 100 fois plus grande que celle des effets des autres courants.

On conçoit alors que si l'intensité du courant de même période que le son du monotéléphone est faible, les sons produits dans l'appareil par les autres courants et dont l'intensité est le 50e ou le 100e de celle du son principal, soient sans effets sensibles sur l'oreille, et par suite négligeables : en ce cas, on peut dire que *même en pratique*, la monophonie est réalisée. Mais lorsque l'intensité du son principal est

trop forte, celle de sons d'intensité réduite même au 50e et au 100e de celle du premier peut ne pas être insensible à l'oreille. L'expérience prouve qu'alors, en effet, on entend à la fois dans un monotéléphone un son clair et net correspondant au courant de même période que lui, et une sorte de bruissement ou de crépitement plus ou moins accentué, dû aux autres courants, et comparable à ce qu'on nomme dans la pratique de la téléphonie *des bruits de friture*, ou en abrégeant, de *la friture.*

Dans l'emploi du système sur de longues lignes, où l'obligation de surmonter la résistance et la capacité de la ligne nécessitait l'emploi au départ de courants ondulatoires assez intenses, cette friture, dans les monotéléphones du poste transmetteur, pouvait gêner beaucoup la réception des signaux arrivant de la ligne ; il fallait chercher à la faire disparaître.

I. — Le moyen le plus direct de résoudre cette difficulté et en même temps le plus simple, consistait à diminuer le plus possible l'intensité des courants ondulatoires émis, jusqu'à ce que la friture dans les monotéléphones du poste transmetteur fût négligeable.

Mais alors la faiblesse des courants qui arrivent au poste récepteur exige une grande sensibilité dans l'action des monotéléphones. Des essais furent faits en vue de transformer chacun d'eux en relais microphonique très sensible. On a pu obtenir ainsi des résultats assez bons mais irréguliers : j'ai abandonné provisoirement ce procédé, me réservant de le reprendre plus tard en le perfectionnant.

II. — Le second moyen consistait à éteindre la friture indépendamment de l'intensité des courants émis, et quelle que fût cette intensité.

Le problème technique qui se posait ainsi était le suivant : interposer entre les transmetteurs et les récepteurs d'un même poste, un dispositif tel que les courants ondulatoires transmis de ce poste sur la ligne fussent sans action sensible sur les récepteurs du même poste, en laissant ceux-ci fonctionner sous l'action des courants arrivant en *même temps* du poste correspondant par la même ligne.

C'était, pour les courants ondulatoires ou alternatifs rythmés, un problème analogue à celui déjà résolu pour les courants ordinaires dans les systèmes de télégraphie duplex : mais ici le problème était plus difficile à résoudre : car si pour annuler les effets de deux courants constants ordinaires en un point, il suffit de les y faire arriver en sens inverse, en même temps, et avec la même intensité, cela ne suffit pas pour les courants ondulatoires ; il faut encore (et c'est le point le plus délicat) qu'ils arrivent au point considéré *dans la même phase* de leur mouvement.

Pour arriver au but, j'avais d'abord essayé de me servir d'un double enroulement sur les noyaux des électro-aimants des monotéléphones montés ainsi en différentiel, dispositif qui donnait d'assez bons résultats ; mais l'inconvénient de l'affaiblissement des courants à l'arrivée persistait toujours.

Après avoir essayé plusieurs autres dispositifs, je m'arrêtai à une combinaison séparant nettement les circuits de ligne et les circuits transmetteur et récepteur, combinaison comprenant un relais télémicrophonique différentiel, et des bobines d'induction munies de condensateurs : un système de ce genre figura à l'Exposition universelle de Chicago en 1893.

Mais le résultat désiré était encore incomplet. Je

modifiai et simplifiai progressivement le relais, j'ajoutai une ligne artificielle et des condensateurs gradués à la combinaison, qui constitua alors l'ensemble qui va être décrit (*).

Je reprendrai d'abord l'examen des principes généraux sur lesquels repose la télégraphie multiplex, et je décrirai ensuite les appareils et combinaisons d'appareils qui m'ont servi à la réaliser.

PRINCIPES DE LA TÉLÉGRAPHIE MULTIPLE RÉVERSIBLE OU MULTIPLEX

La télégraphie multiple est l'art de transmettre rapidement sur un même circuit plusieurs signaux émis par plusieurs appareils.

Cette transmission peut être faite de deux façons générales.

1° Ou bien il s'agit de transmettre plusieurs signaux dans un seul sens entre deux postes, ces signaux ne pouvant pas *se croiser simultanément* à chaque instant en chaque point du circuit; on peut alors l'appeler transmission *multiple non réversible*, ou, simplement, *multiple*.

D'ailleurs elle peut être *successive* ou *simultanée* : *successive*, lorsque, en chaque point du circuit, les signaux *se succèdent* plus ou moins rapidement : c'est ce qui arrive par exemple dans les systèmes de télégraphie double de M. Sieur, multiple de Meyer, de Delany, de M. Baudot... : *simultanée*, lorsque, en chaque point du circuit, les signaux passent *simultanément* à

(*) Cet ensemble dérive, comme on le voit, d'études continûment et logiquement poursuivies, pendant lesquelles j'ai été constamment aidé par M. Anizan, rédacteur, breveté de l'École supérieure des Postes et Télégraphes, que l'Administration a bien voulu mettre pendant un an à ma disposition, et qui, depuis 1890, me continue sa précieuse collaboration.

chaque instant et sans confusion, comme, par exemple, dans le multiple harmonique de E. Gray, et dans la téléphonie ordinaire, car, lorsqu'on téléphone une simple voyelle, on émet *à la fois* sur le circuit le son fondamental et les harmoniques qui caractérisent le timbre.

2° Ou bien il s'agit de transmettre plusieurs signaux *simultanément*, *dans les deux sens à la fois*, de façon qu'en chaque point du circuit, et à chaque instant, plusieurs signaux puissent *se croiser* sans altération ni confusion ; on peut alors appeler ce mode de transmission : transmission *multiple réversible.*

Tels sont :

(*a*) Le système de télégraphie *simple réversible* appelé ordinairement *duplex* ; par exemple le système Morse dit *duplex*, qui permet la transmission réversible de deux signaux, à l'aide d'un pont de Wheatstone ou d'un électro-aimant différentiel.

(*b*) Le système de télégraphie *double réversible* ; par exemple le système double de M. Sieur duplexé, ou le système dit *quadruplex* de M. Edison..., qui permettent la transmission réversible de quatre signaux.

(*c*) Enfin le système de télégraphie *multiple réversible*, ou *multiplex*, qui permet la transmission réversible de *n* signaux, *n* pouvant être à volonté égal à 2, 4, 6, 8..., etc.

C'est celui qui va être décrit, et dans lequel, ainsi qu'on le verra, *n* peut aller actuellement jusqu'à 24.

Par définition, la télégraphie multiple réversible ou multiplex devant réaliser la transmission *simultanée*, *dans les deux sens*, de groupes de signaux différents, il faut donc que les récepteurs de chacun des deux postes en communication soient *constamment* acces-

sibles aux courants transmis des deux côtés sur la même ligne. Il faut par suite que cette ligne soit *toujours* reliée aux récepteurs des deux postes : comme conséquence immédiate, les courants émis par un poste sont forcés de traverser les récepteurs de ce poste, ou tout au moins d'agir sur eux, avant d'arriver, par la ligne, aux récepteurs du poste correspondant.

Or, pour pouvoir recevoir des signaux dans un poste en même temps qu'on en transmet, il est absolument nécessaire que l'action des signaux transmis sur les récepteurs du poste transmetteur soit pratiquement éteinte, c'est-à-dire rendue négligeable par rapport à l'action des signaux reçus. De là, la nécessité d'établir un circuit, dit *extincteur*, dans lequel un système d'appareils soit combiné de manière à éteindre les effets des signaux transmis sur les récepteurs du poste transmetteur.

Tout système de télégraphie duplex, quadruplex..., multiplex réversible doit donc comprendre les circuits suivants, ouverts ou fermés suivant les cas (voir plus loin les figures 1 et 3).

1° Un circuit transmetteur, C*t*, dans lequel sont disposés les appareils transmetteurs des courants.

2° Un circuit récepteur C*r* où se trouvent les appareils récepteurs.

3° Un circuit de ligne C*l* formé par une ligne simple avec terres aux deux bouts, ou une ligne double comme pour la téléphonie.

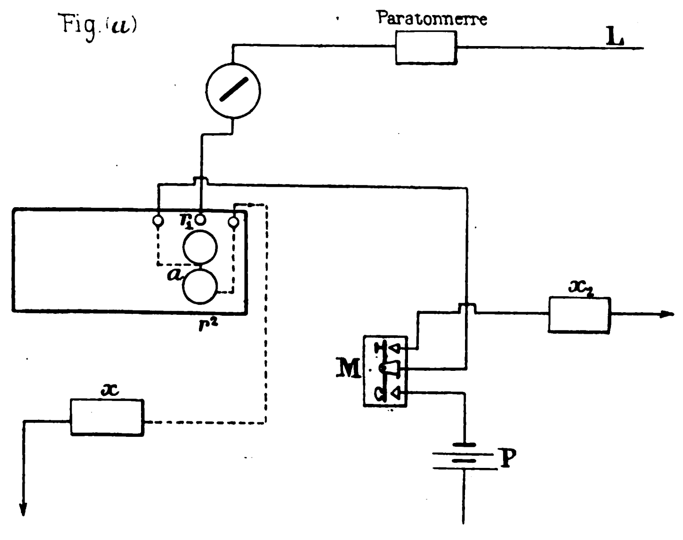
4° Enfin un circuit extincteur C*e*, où se trouvent les appareils destinés à éteindre ou neutraliser les effets des signaux transmis sur les récepteurs du poste transmetteur (on l'appelle habituellement ligne factice ou artificielle, parce qu'on cherche à rendre ce sys-

tème équivalent en résistance et capacité à la ligne réelle qui relie les deux postes correspondants).

Dans tous les systèmes de télégraphie duplex et quadruplex connus, les trois premiers circuits et le plus souvent même le quatrième, sont en contact *direct* les uns avec les autres en un ou plusieurs points, soit le point de bifurcation des deux parties d'un appareil différentiel, soient les sommets d'un pont de Wheatstone.

En voici quatre exemples principaux bien connus de tous les techniciens :

Premier exemple. — Appareil Morse monté en duplex *fig.* (*a*) (*).

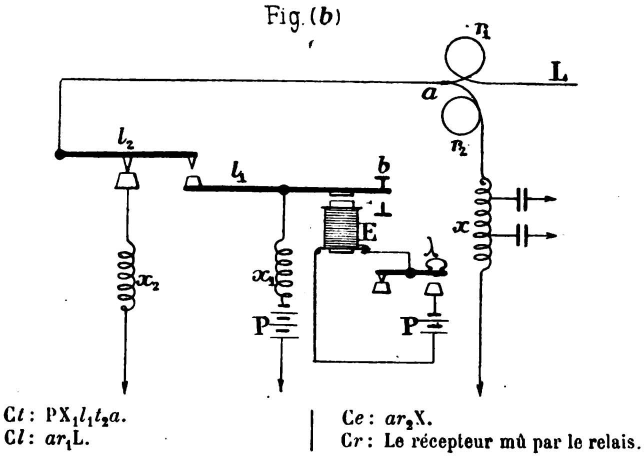


Circuit transmetteur, Ct : PMa.	Circuit récepteur, Cr : ar_2X.
Circuit de ligne, Cl : ar_1L.	Circuit extincteur, Cc : ar_2Rh.

Ct, Cl, Ce, Cr sont en contact au point a.

(*) Les figures *a*, *b*, *c*, *d* sont extraites du *Traité de Télégraphie* de M. Thomas.

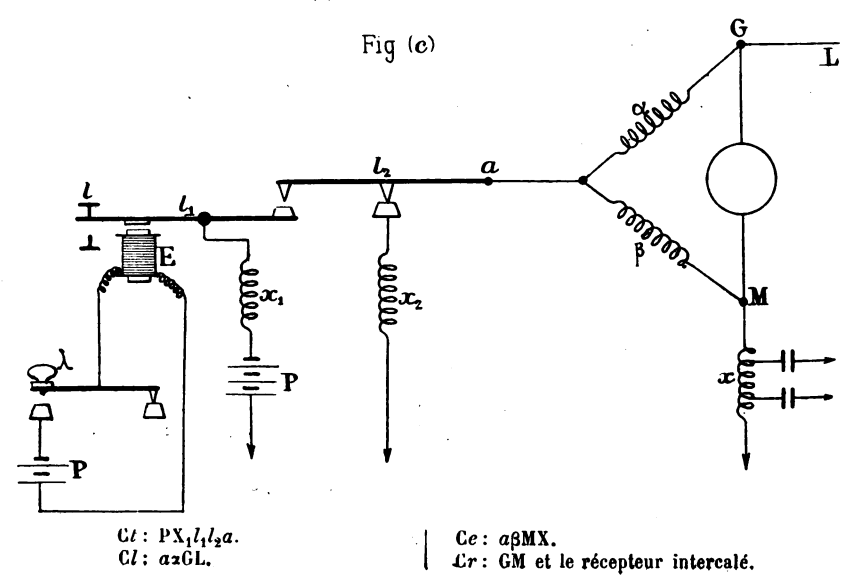
2[e] Exemple. — Duplex monté en différentiel *fig.* (*b*).



Ct: $PX_1l_1t_2a$.
Cl: ar_1L.
Ce: ar_2X.
Cr: Le récepteur mû par le relais.

Les circuits Ct, Cl et Ce se touchent au point a.

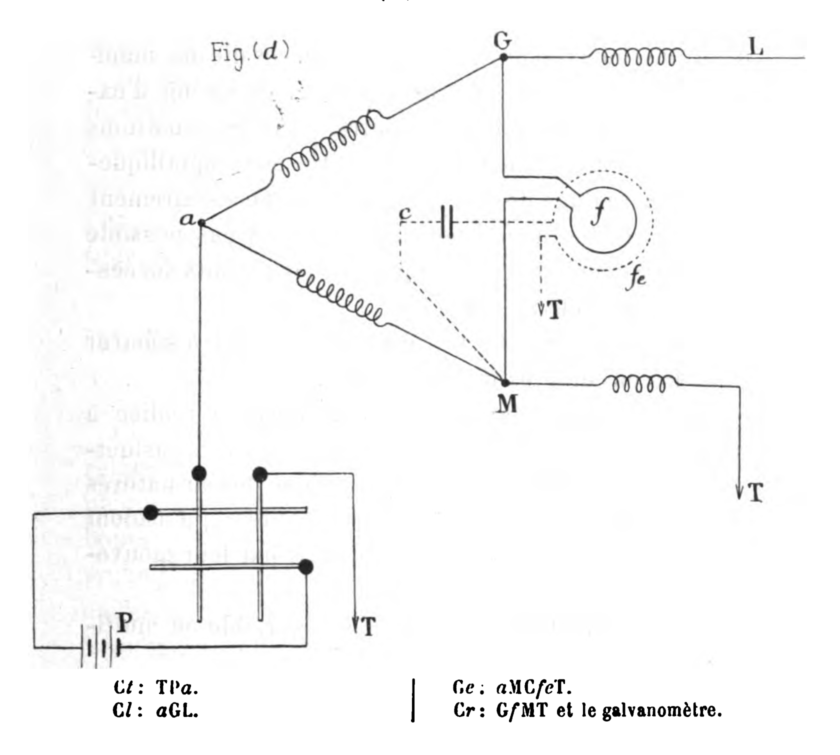
3[e] Exemple. — Duplex monté avec un pont de Wheatstone *fig.* (*c*).



Ct: $PX_1l_1l_2a$.
Cl: $a\alpha GL$.
Ce: $a\beta MX$.
Cr: GM et le récepteur intercalé.

Les trois premiers circuits se touchent au point *a* : C*l* et C*r* en G; C*e* et C*r* en M.

4e Exemple. — Duplex, système Ailhaud, pour les câbles sous-marins *fig.* (*d*).



C*t* : TP*a*.	C*e* : *a*MC*fe*T.
C*l* : *a*GL.	C*r* : G*f*MT et le galvanomètre.

Les trois premiers circuits se touchent encore au sommet *a* du pont; C*l* et C*r* en G; C*e* et C*r* en M.

Il y a quelques systèmes de duplex, celui d'Edison par exemple, où le circuit récepteur C*r* est tout à fait distinct des autres, parce qu'on agit sur lui à distance, par induction, mais les trois autres circuits sont reliés les uns aux autres.

A priori cette liaison des circuits présente des in-

convénients ; car alors les courants de charge et décharge, et, en général, tous les courants à régime variable qui se produisent sur le circuit de ligne affectent plus ou moins tous les autres circuits simultanément, et il en résulte des difficultés spéciales dans les transmissions, ce qui par exemple nécessite des manipulateurs spéciaux, et dans le réglage du circuit d'extinction ou ligne factice. En outre, dans les conditions où les circuits communiquent entre eux métalliquement, le réglage de l'un d'eux affecte nécessairement tous les autres simultanément, et il n'est pas possible de régler simplement les appareils des circuits successivement et individuellement.

Il y a donc une réelle utilité à chercher à séparer tous les circuits les uns des autres.

Dans certains duplex ou quadruplex on réalise à peu près cette séparation pour les circuits transmetteurs et récepteurs en faisant usage des armatures mobiles de relais ordinaires ou aimantés, qui isolent ces circuits des autres en les fermant par leur mouvement même.

On y parvient dans le multiple réversible ou multiplex :

1° En n'employant pour les transmissions que des courants vibrants, ondulatoires ou ondulés, qui *par leur nature même*, satisfaisant à la loi mécanique de la coexistence des petites oscillations, peuvent se superposer sans confusion, et même se croiser sans l'emploi d'un mécanisme quelconque, d'où le nom de *réversible* donné au système.

2° En transformant dès l'abord tous ces courants, recueillis dans un premier circuit, en courants vibrants semblables *par induction* dans d'autres circuits sépa-

rés du premier par l'isolant des fils de transformateurs servant à la transformation.

3° En séparant les autres circuits les uns des autres au moins par des couches isolantes de fils de bobines d'induction et de relais ou autres appareils différentiels.

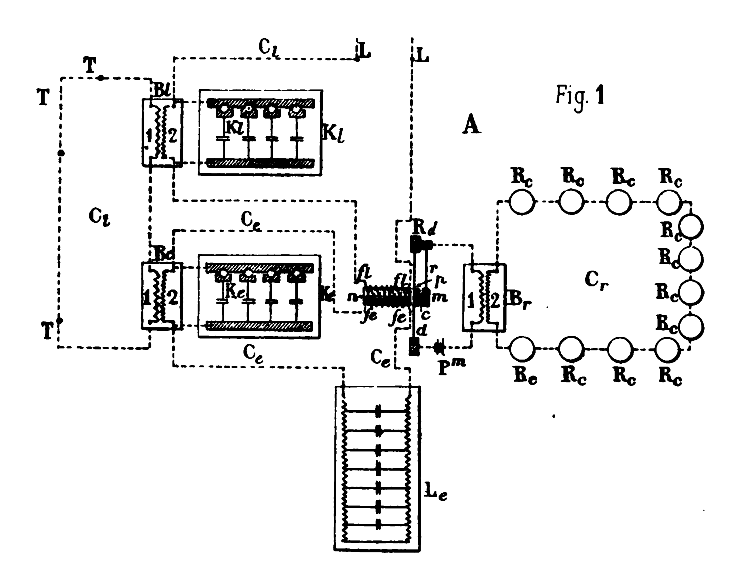
Nous allons décrire d'abord d'une manière générale le système employé pour mettre effectivement en relation ces circuits les uns avec les autres en satisfaisant aux conditions qu'on vient d'établir : on pourrait l'appeler : système collecteur, distributeur et extincteur de courants vibrants.

Système collecteur, distributeur et extincteur de courants vibrants.

Ce système est destiné à mettre simultanément en relation (*fig.* 1) une ligne téléphonique ou télégraphique à deux fils LL, ou à un fil avec terres aux deux bouts : 1° avec le circuit *transmetteur* C*t* où l'on produit un ou plusieurs systèmes de courants ordinaires ou alternatifs ou ondulatoires de périodes ou fréquences différentes, à l'aide d'appareils T quelconques ; 2° avec le circuit *récepteur* C*r* renfermant des appareils R*c* pouvant recevoir les courants dont on vient de parler, et les utiliser pour la télégraphie, la téléphonie, ou autrement ; 3° avec le circuit *extincteur* C*e*, dont le rôle sera expliqué plus loin complètement.

I. — La relation du circuit de la ligne C*l* avec le circuit transmetteur C*t* s'établit par l'intermédiaire du fil secondaire 2 d'une bobine d'induction B*l* (bobine d'induction *de ligne*) dont le fil primaire 1 fait partie du circuit C*t* : le circuit de la ligne lui-même est com-

plété par le fil *fl* enroulé sur le noyau *n* de l'électro-aimant d'un téléphone faisant partie d'un appareil R*d* décrit plus loin.



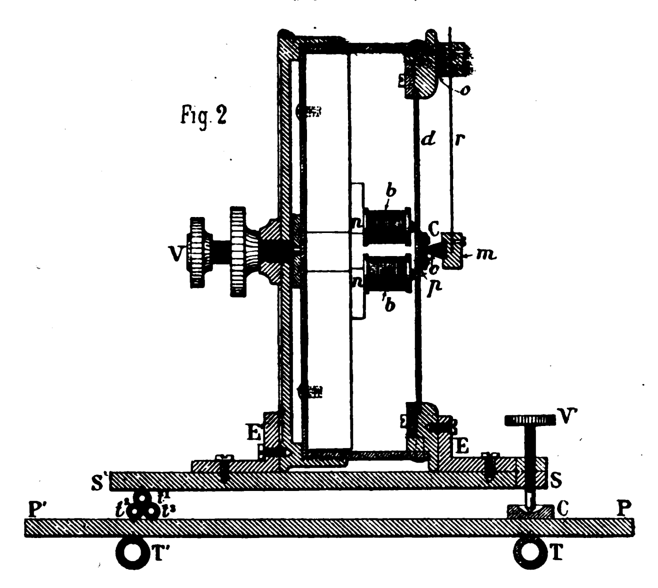
II. — La relation du circuit de ligne C*l* avec le circuit extincteur C*e* s'établit par l'intermédiaire d'un second fil *fe*, identique à *fl*, enroulé sur le même noyau *n*. Le circuit C*e*, outre le fil *fe*, renferme le fil secondaire 2 d'une autre bobine d'induction B*e* (bobine d'*extinction*) identique à B*l*, et une ligne artificielle L*e* formée de résistances et de condensateurs gradués.

Les fils primaires des bobines B*l* et B*e*, disposés en série, font partie du circuit transmetteur C*t*.

III. — La relation de la ligne avec le circuit récepteur C*r* s'établit par l'intermédiaire d'un *Relais télé-*

microphonique différentiel Rd et du fil secondaire 2 d'une bobine d'induction Br (bobine de *réception*).

Le relais est formé : (*fig.* 1 et 2).



1° D'un téléphone dont le diaphragme est *d*, et le noyau de l'électro, *n*, sur lequel sont enroulés deux fils identiques, *fl* et *fe*, pouvant être parcourus en sens inverse par les courants venant d'une même source.

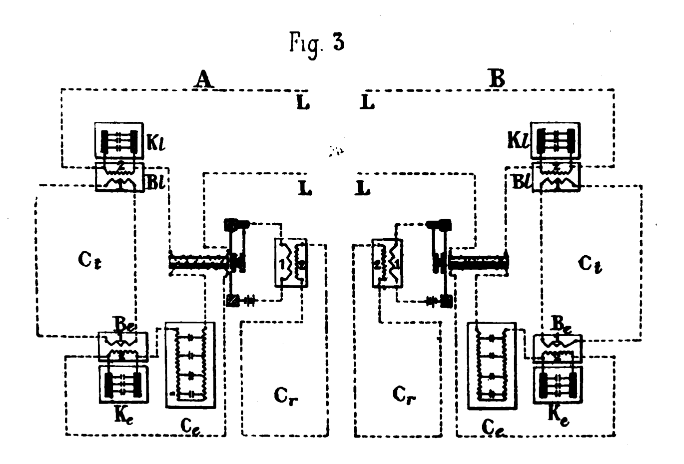
2° D'un microphone composé d'une plaque *p* de charbon vissée au diaphragme *d*, d'un contact *c* de charbon fixé à une masse métallique *m*, supportée par un ressort *r* plat et mince, fixé à la monture du téléphone, isolé de l'appareil par une plaque d'ébonite *o* et dont la longueur peut varier; une vis V permet de rapprocher les bobines *bb* du diaphragme du téléphone.

Deux équerres EE′ fixent le téléphone sur un socle SS′ qui porte d'un côté un tube de caoutchouc épais t', reposant sur deux autres tubes t^2 t^3 juxtaposés et fixés à une plate-forme PP′. Celle-ci repose elle-même sur deux tubes en caoutchouc T, T′, et porte une borne creuse métallique C. Une vis V′, fixée à SS′, et dont la pointe butte sur le fond de la borne C, permet de faire tourner l'appareil autour du tube t', comme charnière, de façon à régler le contact entre c et p, et par suite, la sensibilité microphonique. L'ensemble des tubes soustrait l'appareil aux effets des trépidations extérieures.

pm est la pile de ce microphone; 1 est le fil primaire de la bobine B*r* du microphone, et 2 est le fil secondaire dans lequel le circuit récepteur C*r* est intercalé.

Le système est complété par deux condensateurs

Fig. 3



gradués; l'un K*l* (condensateur de ligne) établi en dérivation sur la bobine de ligne B*l*; l'autre, K*e* (condensateur d'extinction) établi en dérivation sur la bobine

B*e* du circuit d'extinction C*e* : on va voir tout à l'heure le rôle important que jouent ces condensateurs.

Enfin la ligne LL (*fig.* 3) peut réunir deux postes ou stations, renfermant le système d'appareils qui vient d'être décrit; et chacun d'eux peut transmettre simultanément ou non dans son circuit C*t* des systèmes de courants ordinaires, ou alternatifs, ou ondulatoires identiques reçus dans l'autre station par l'intermédiaire de cette ligne LL.

Fonctionnement du système.

Ce système remplit une triple fonction (*fig.* 1).

I. — Le système est *collecteur* des courants ordinaires, ou alternatifs, ou ondulatoires arrivant par la ligne, car leur énergie au passage à travers le fil *fl* est transformée en énergie mécanique dans le diaphragme *d* du téléphone, dont les molécules vibrent synchroniquement avec tous ces courants, reproduisant sans altération leurs périodes ou fréquences s'ils sont ondulatoires.

Le système peut être *en même temps* collecteur des courants de même nature que ceux de la ligne, produits dans le circuit transmetteur C*t* et qui arrivent à la fois au téléphone ou relais R*d*, en sens inverse, par l'intermédiaire des deux bobines B*r* et B*e* et des deux enroulements des fils *fr* et *fe* : nous allons revenir tout à l'heure sur ce point.

II. — Le système est *distributeur* automatique dans le circuit récepteur C*r* des courants arrivant de la ligne L; car les mouvements que ces courants produisent dans le diaphragme *d* du téléphone se transmettent sans altération au contact microphonique *p*, *c*, et se reproduisent avec l'intermédiaire du fil primaire

1 par induction sur le fil secondaire de la bobine B*r* du relais, dans le circuit récepteur C*r*.

Nous allons voir que les courants produits dans le circuit transmetteur C*t*, et qui peuvent arriver aussi dans le fil *fe* du relais ne produisent aucun effet dans le circuit récepteur C*r*.

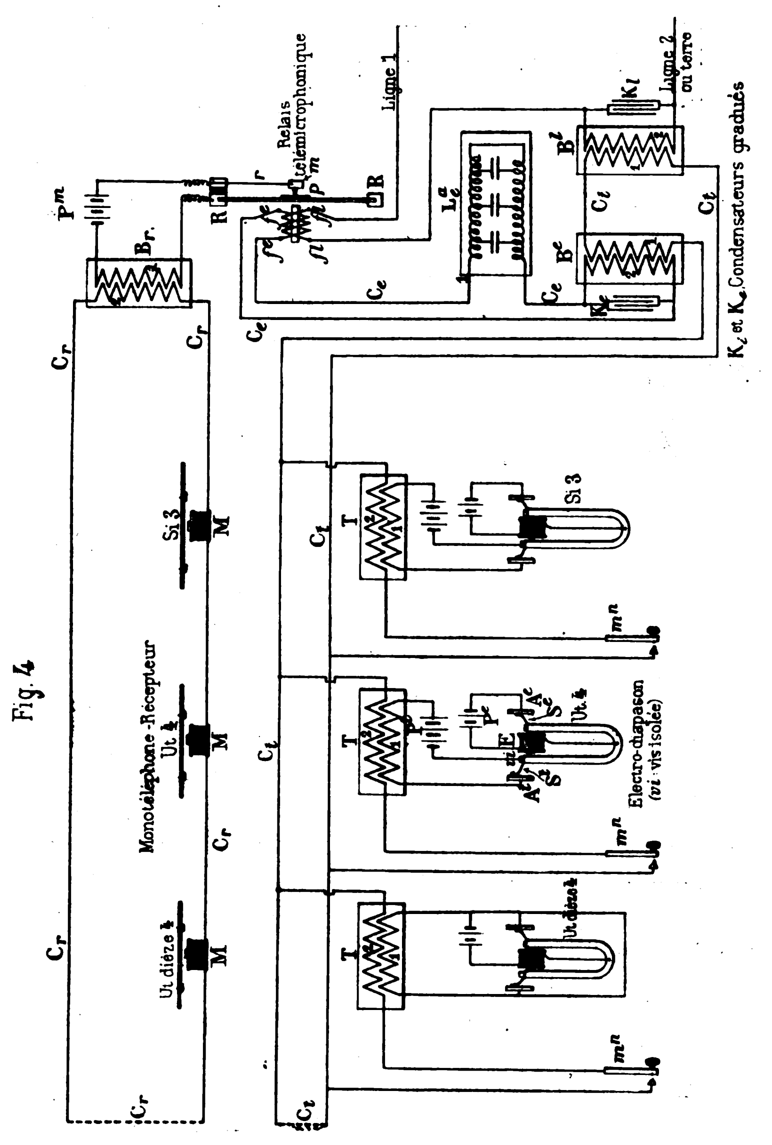
III. — Le système est *extincteur*, dans le relai R*d* des courants produits dans le circuit transmetteur de la station où se trouve ce relais.

En effet, ces courants arrivent *en même temps* par les deux bobines B*l* et B*e*, et en *sens inverse*, dans les fils *fl* et *fe* du relais. Si ce sont des courants ordinaires originairement constants, ils se détruisent; si ce sont des courants ondulatoires, ils ont *même fréquence* : on peut de plus leur donner la *même phase* en faisant varier le rapport des capacités des condensateurs gradués K*l*, K*e*, et de la ligne artificielle L*e* à résistance et condensation graduées, parce qu'on agit avec eux sur la self-induction des bobines B*l*, B*e*. Ce résultat est capital dans le système, car alors ces courants arrivant *en même temps* dans le relais, *en sens inverse*, *avec la même fréquence* et *avec la même phase*, n'ont aucune action sur le relais, ils sont éteints dans ce relais pendant qu'ils se propagent librement sur la ligne LL.

L'expérience prouve que ce résultat est facilement obtenu par la simple manœuvre des condensateurs gradués K*l* et K*e*, de capacité convenable.

APPLICATION DE CE SYSTÈME AU MULTIPLEX.

Dans la description ci-dessus j'ai laissé, à dessein, indéterminée la nature des transmetteurs dans le cir-



cuit Ct et des récepteurs dans le circuit Cr, pour

montrer la généralité du système; voici maintenant les appareils qui en permettent l'application au multiplex.

I. *Transmetteurs.* — La *fig.* 4 représente schématiquement quelques détails du circuit transmetteur et l'ensemble des autres circuits.

Le transmetteur actuel est ce que je nomme un *électrodiapason inductophone*, il y en a seulement trois dessinés en plan sur la *fig.* 4, il faut en supposer douze.

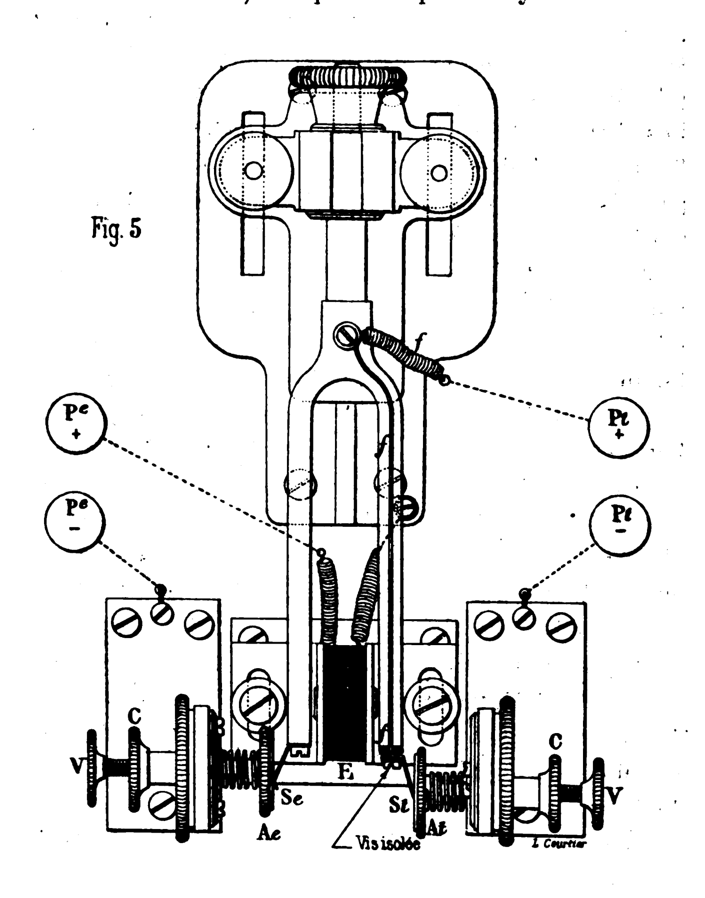
L'électrodiapason in ductophone, représenté en plan dans la *fig.* 5, est un électrodiapason, c'est à-dire un diapason entretenu électriquement en mouvement vibratoire continu : à cet effet, un électro-aimant E, placé entre les branches de l'instrument, communique d'un côté avec le pôle d'une pile *d'entretien* P*e*, de l'autre avec la masse du diapason et avec un style en acier S*e* (style d'entretien) de longueur convenable, fixé à l'une des branches, en face d'une plaque de platine A*e* communiquant avec l'autre pôle de la pile; il suffit de mettre en contact A*e* et S*e* pour que l'électro agisse sur les branches, rompe le contact, qui se rétablit quand les branches reviennent vers leur position primitive, et ainsi de suite.

J'ai complété cet appareil, que j'ai imaginé en 1873, de la manière suivante :

Un second style S*t*, ou style de transmission, est fixé à la seconde branche par une vis isolée électriquement du diapason par un bloc d'ivoire : on le met en communication par un fil d'aluminium isolé *f* (*fig.* 5) avec le pôle d'une autre pile P*t* ou pile de transmission, dont l'autre pôle est relié à une plaque de pla-

tine At par l'intermédiaire de l'un des fils 1 d'un transformateur d'induction T (*fig.* 4).

Pendant le mouvement du diapason, entretenu comme on l'a dit, chaque fois que le style St touche



At, la pile Pt envoie un courant dans le fil n° 1 du transformateur (*fig.* 4) : celui-ci est donc parcouru à chaque seconde par un nombre de courants égal au nombre de vibrations du diapason.

Il en résulte un nombre *égal* de courants *induits* dans le fil n° 2 du transformateur identique au fil n° 1 ; d'où la qualification d'*inductophone* donnée à l'instrument décrit.

Dispositif simplifié (représenté à gauche de la *fig.* 4 sur l'électrodiapason *ut* dièze$_4$). — On supprime la pile de transmission P*t*, le fil isolé *f* et la vis isolée. Les deux boutons P*t* (*fig.* 5) sont reliés d'une part au fil primaire 1 du transformateur T (*fig.* 4) et d'autre part ils sont mis en dérivation sur le circuit de l'électro E d'entretien. Ainsi c'est une dérivation du courant vibrant d'entretien fourni par la pile P*e* qui parcourt d'une manière continue le fil n° 1 du transformateur. Quand les résistances de ce fil et de la bobine E sont à peu près égales, l'intensité des courants émis dans la dérivation est suffisante pour le bon fonctionnement du système, même sur de longues lignes, quand la pile P*e* se compose de 2 ou 3 éléments Leclanché à grande surface par exemple. De plus, en reliant métalliquement les boutons P*e* et P*t* ou les plaques A*e* et A*t* (*fig.* 4 et 5), le style S*t* n'étant plus isolé du diapason, il en résulte que si le style S*e* se casse, ou si la plaque de platine A*e* est usée, l'on peut immédiatement entretenir le mouvement de l'électrodiapason avec le style S*t* et la plaque A*t*. L'appareil est ainsi simplifié, et il se trouve en quelque sorte à double effet.

Enfin les fils n° 2 des douze transformateurs T (*fig.* 4) sont placés en dérivation sur le circuit transmetteur C*t* par l'intermédiaire d'un manipulateur *mn* (*fig.* 4). De telle sorte que si l'on abaisse l'un quelconque de ces manipulateurs, il s'établit dans le circuit transmetteur et, par suite, dans les fils primaires des bo-

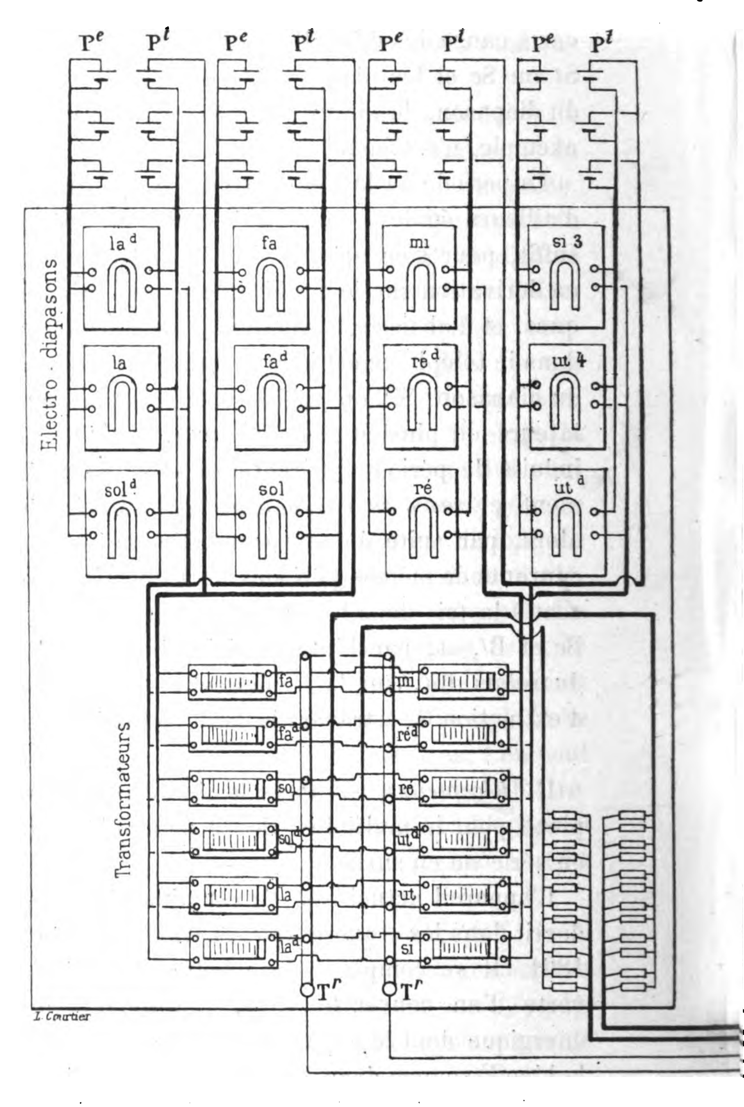
bines d'induction B*e* et B*l* (*fig.* 1 et 4) un courant intermittent rythmé, ou plutôt un courant ondulatoire, car à cause des étincelles qui éclatent entre les styles S*t* ou S*e* et les plaques A*t* ou A*e* à chaque vibration du diapason, le circuit de *transmission* P*t* S*t* A*t*, par exemple, n'est jamais tout à fait rompu.

La période ou la fréquence de ce courant induit est d'ailleurs égale à celle du diapason correspondant; il suffit, pour s'en apercevoir, de mettre un téléphone en dérivation sur le circuit C*t* en deux points quelconques, et d'abaisser le manipulateur *mn*; le son perçu dans le téléphone est identiquement le même que celui du diapason. Si l'on abaisse à la fois tous les manipulateurs ou plusieurs d'entre eux, les divers courants induits de période différente se propagent simultanément et *sans se confondre*, dans le circuit C*t*. Et alors, par suite d'une seconde induction, autant de courants de mêmes périodes ou fréquences se produisent à la fois dans les fils secondaires 2, des bobines B*e* et B*l*, et, par l'intermédiaire des deux fils *fe* et *fl* du relais R*d*, sur la ligne réelle, et dans le circuit d'extinction C*e* à travers la ligne artificielle L*e*.

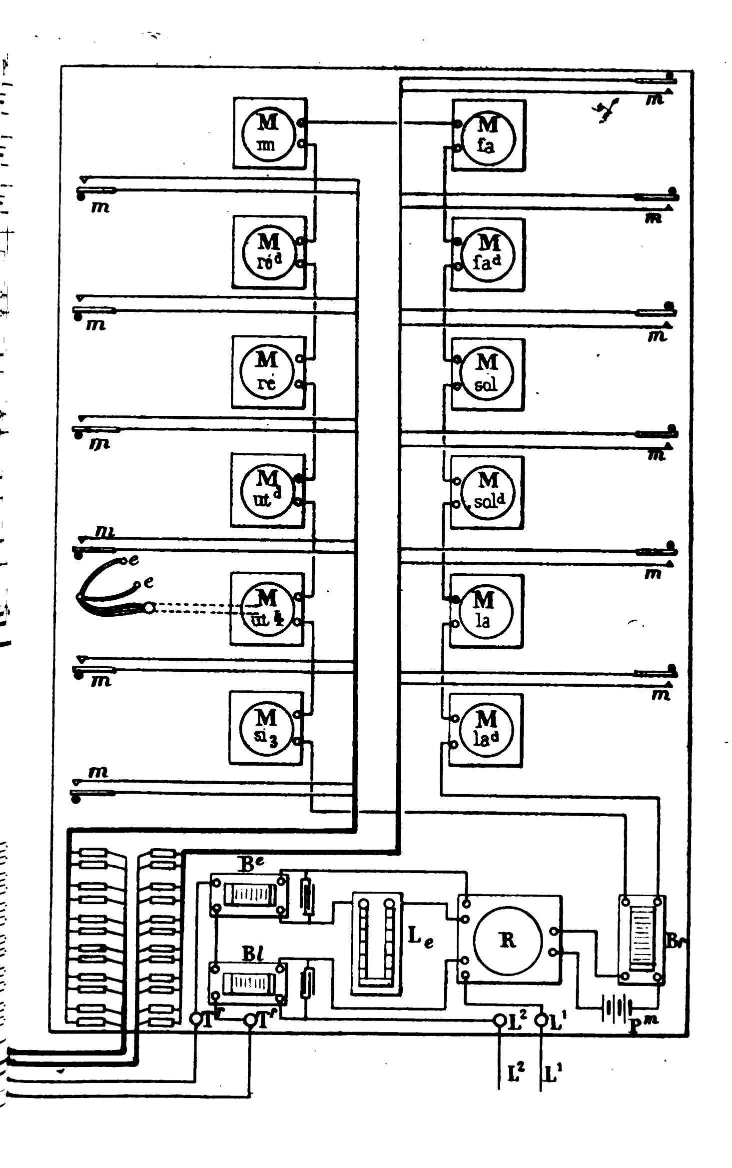
II. *Récepteurs.* — Dans le circuit récepteur C*r*, on place pour le multiplex, douze monotéléphones reliés en série ou en surface.

L'appareil actuel (*fig.* 6) est plus simple que celui décrit dans les *Annales télégraphiques*, n° de mai-juin 1891. Il se compose d'une boîte cylindrique recouverte d'un couvercle vitré, renfermant un aimant énergique dont le noyau creux N est recouvert d'une bobine E comme dans un téléphone ordinaire; mais la membrane téléphonique, d'environ 2 millimètres d'é-

Fig. 7

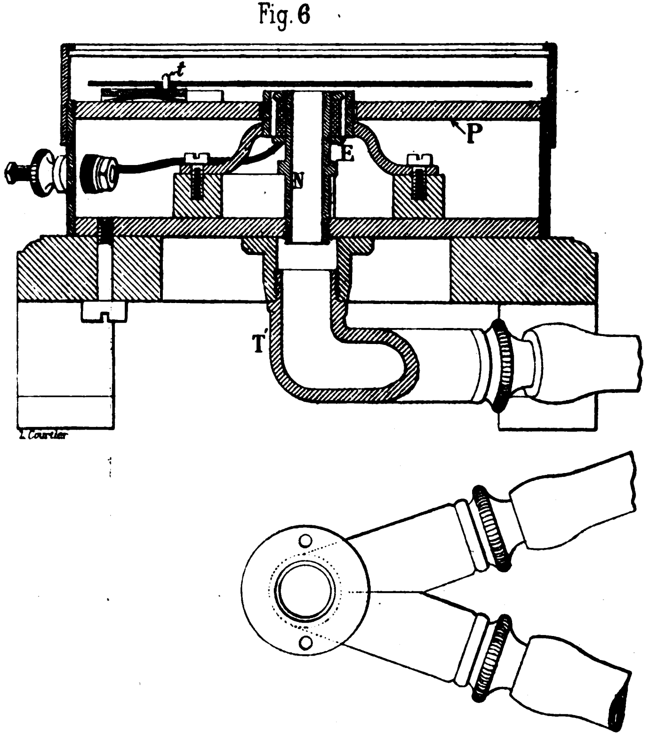


Pe
Pl
Pe
Pl
Pe
Pl
Pe
Pl
Electro · diapasons
la d
la
sol d
fa
fa d
sol
mi
ré d
ré
si 3
ut 4
ut d
Transformateurs
fa
fa d
sol
sol d
la
la d
mi
ré d
ré
ut d
ut
si
Tr
Tr
L. Courtier


M
m
M
ré^d
M
ré
M
ut^d
M
ut 4
M
si 3
M
fa
M
fa^d
M
sol
M
sol^d
M
la
M
la^d
m
e
e
B^e
Bl
L_e
R
Br
T^r
T^f
L^2
L^1
P^m

paisseur, au lieu d'être encastrée sur sa circonférence, est posée simplement sur trois points de la circonférence de la première ligne nodale par des tiges *t* fixées à des glissières mobiles sur un rayon de la plateforme circulaire P qui les supporte. Les diamètres des membranes sont déterminés par la condition qu'elles

Fig. 6



rendent pour leur premier harmonique les sons Si_3 (480 vibrations par seconde), Ut_4 (512 vibrations), Ut dièze$_4$ (543), et ainsi de suite de demi-ton en demi-ton jusqu'à La_4 inclusivement (900 environ). Chacune d'elles est exactement accordée avec un des électro-diapasons transmetteurs.

Dans ces conditions, quand on fait passer dans la bobine E une série de courants ondulatoires dont la période est égale à celle du premier harmonique de la membrane, celle-ci résonne énergiquement, tandis qu'elle reste à peu près immobile si cette période en diffère d'une quantité correspondant à un demi-ton au moins; d'où le nom de *monotéléphone* donné à l'instrument, qui en effet ne renforce véritablement qu'*un seul* son. Ces récepteurs monotéléphoniques sont donc réellement caractérisés par le son de leur premier harmonique; c'est en ce sens qu'on peut dire, pour abréger, monotéléphone ou récepteur Si_3, Ut_4, Fa_4...

Pour recueillir les ondes sonores produites par l'un des récepteurs vibrant sous l'influence de signaux produits par des courants ondulatoires de même période que lui, un tube T' est ajusté au noyau creux de l'électro E, et divisé en deux branches reliées aux oreilles par l'intermédiaire de tubes légers de caoutchouc terminés par deux embouts recourbés en ébonite ou en verre, dits *écouteurs*. Ces embouts peuvent être maintenus aux oreilles par un ressort léger en acier en forme de V passant sous le menton de l'opérateur. L'un de ces écouteurs est indiqué sommairement au bas de la *fig.* 7 (récepteur Ut_4). La bobine de l'électro est recouverte d'un grand nombre de tours de fil fin formant une résistance de 200 à 400 ohms.

Enfin la plate-forme P qui supporte les disques est vissée dans la monture de l'appareil, de telle sorte qu'en la vissant ou la dévissant on rapproche ou on éloigne le disque du noyau de l'électro-aimant et, par suite, on sensibilise plus ou moins l'appareil. Cette opération peut se faire sans interrompre la réception.

Trois de ces récepteurs monotéléphoniques corres-

pondant aux sons Si_3, Ut_4, Ut dièze 4, sont représentés schématiquement par leur électro-aimant et leur plaque vibrante dans la *fig.* 4. Le circuit récepteur C*r* qui les contient est fermé à gauche en pointillé, et à droite par le fil secondaire de la bobine d'induction B*r* du relais R*d*. Il faut supposer douze monotéléphones, procédant par demi-tons, de Si_3 à La dièze $_4$ rangés à la suite les uns des autres dans ce circuit, comme on les a indiqués dans la *fig.* 7.

III. *Transmission et réception simultanées des signaux.* — On voit, d'après cette description, comment les signaux sont transmis et reçus simultanément en se croisant sans s'altérer réciproquement.

Supposons les diapasons en marche dans les deux postes correspondants [A] et [B] (*fig.* 3 et 4). Si dans le poste [A] un employé produit des signaux Morse avec le manipulateur *mn* relatif au diapason Si_3 par exemple (*fig.* 4), ces signaux se produisent par induction à la fois dans les fils n° 2 des bobines B*e* et B*l*; ceux de B*l* s'en vont sur la ligne en traversant le fil *fl* du relais R*d*; mais leur effet sur le relais est annulé par celui des signaux simultanément produits dans la bobine B*e* et qui traversent la ligne artificielle L*e* et le fil *fe* du relais, lorsque la ligne L*e* et les condensateurs K*l* et K*e* sont bien réglés. Le relais reste donc immobile tandis que les signaux transmis se propagent sur la ligne et arrivent au poste [B], traversent le fil n° 2 de la bobine B*l* et le fil *fl* du relais R*d* du poste [B]; là ils ne sont pas annulés, le contact microphonique *pm* fonctionne, produit les signaux dans le fil n° 1 de la bobine d'induction B*r*; le fil n° 2 les reproduit par induction à travers tous les monotéléphones

placés dans le circuit récepteur *Cr*; mais le monotéléphone Si_3 seul est mis en vibration, et l'employé qui dessert ce récepteur reçoit ainsi les signaux transmis sur le Si_3 par le poste [A].

Pendant le même temps un employé du poste [B] peut transmettre des signaux avec le manipulateur relatif à un diapason quelconque, et même au Si_3; ces signaux se croisent avec les précédents dans les deux postes et sur la ligne, sans s'influencer réciproquement, et le poste [A] les recevra *en même temps* qu'il transmet les précédents.

On voit donc qu'il est possible de produire dans l'un des postes douze transmissions simultanées, s'il y a douze transmetteurs et récepteurs différents installés, d'en recevoir douze *en même temps* du poste correspondant, et d'effectuer ainsi vingt-quatre transmissions simultanées.

IV. *Observations relatives à la mise en pratique du multiplex.* — Les douze monotéléphones récepteurs étant disposés côte à côte sur une même table, l'employé placé en face de chacun d'eux n'a besoin d'avoir sous la main que le manipulateur pour transmettre; il a constamment aux oreilles les embouts des tubes écouteurs du monotéléphone; ses deux mains sont libres quand il ne manipule pas, il peut donc écrire sans aucune gêne les dépêches qu'il reçoit et lit au son, avec la même facilité qu'on lit au son les signaux Morse transmis dans un parleur, ou qu'on lit avec les yeux ces signaux transmis par un appareil optique.

Il n'a nul besoin d'avoir sous la main l'électrodiapason qui produit les courants transmis; au contraire, comme cet instrument fait entendre un son continu

qui pourrait être gênant (surtout s'il y en avait douze sur la même table), il y a avantage à placer ces douze instruments dans un placard capitonné et vitré, où un employé serait chargé de surveiller leur marche; surveillance facile, car il n'y a qu'à constater si les deux styles d'entretien et de transmission S*e* et S*t* produisent bien au contact des plaques de platine A*e* et A*t*, une étincelle nette et continue : il y a lieu aussi de changer de temps en temps les points de contact des styles et des plaques, ce qui est aisé sans arrêter les mouvements, car les plaques sont disposées de façon à tourner sur elles-mêmes dans un même plan vertical.

Dans l'appareil simplifié il n'y a à surveiller qu'un style au lieu de deux.

Les deux piles d'entretien P*e*, et de transmission P *t* peuvent être placées à côté de chaque électrodiapason. J'emploie, en effet, depuis longtemps à cet usage des piles étanches, des éléments-blocs, qui m'ont toujours donné de bons résultats, et qui peuvent être placés partout sans difficulté; ils ont une force électromotrice de $1^{v},48$ et une résistance d'environ $0^{\omega},1$. Un ou deux éléments pour P*e*, deux ou trois au plus pour P*t*, suffisent même pour une ligne comme les lignes téléphoniques de Paris à Bordeaux et à Toulouse sur lesquelles le système a été essayé. Dans l'appareil simplifié la pile P*t* est supprimée, et 2 ou 3 éléments suffisent pour la pile P*e*.

La figure 7 représente le mode d'installation qui pourrait être adopté pour un poste télégraphique, et qui a été essayé au poste central des Télégraphes de Paris.

Dans une salle spéciale, ou, à défaut de salle, dans

un meuble recouvert intérieurement de feutre, et placé à plusieurs mètres de distance de la table ou des tables de manipulation, on disposerait les électrodiapasons recouverts de boîtes vitrées au moins sur la partie antérieure, et rangés par 4 sur 3 tablettes recouvertes de feutre : le meuble étant fermé par une porte vitrée, les opérateurs n'entendraient aucun bruit gênant. L'expérience a d'ailleurs montré que, même sans prendre tant de précautions, les sons continus produits par les diapasons ne gênent pas ces opérateurs. Il en est de même des bruits étrangers, pourvu qu'ils ne soient pas trop intenses, et n'aient pas un caractère musical analogue à celui des sons que reçoivent les opérateurs.

Les piles pourraient être placées dans le bas du meuble, car on peut empiler sans inconvénient les éléments blocs étanches, et 4 éléments sont suffisants pour chaque électrodiapason (l'un d'eux servant de réserve), et chaque transmission, ce qui ne fait que 48 éléments par poste.

Les transformateurs pourraient être disposés sur une planchette, de façon à les mettre en dehors du champ magnétique ondulatoire des électrodiapasons et aussi en dehors de leur champ d'induction mutuelle. Des câbles relieraient les électrodiapasons aux fils primaires des transformateurs correspondants.

Les fils secondaires des transformateurs seraient eux-mêmes reliés par des câbles aux manipulateurs placés à côté des monotéléphones correspondants et aux fils primaires des bobines de ligne et d'extinction B*e*, B*l*.

Ces bobines et tout le reste de l'ensemble des appareils communs aux douze transmissions et réceptions,

ligne artificielle, relais avec sa pile et sa bobine d'induction, seraient placés côte à côte au bout de la table de manipulation ou sur une table spéciale à côté.

Chaque manipulateur ou récepteur devrait être séparé du voisin par une distance d'environ 80 centimètres ou 1 mètre.

Les manipulateurs sont des manipulateurs Morse, ou de simples coupe-circuits à lame élastique oscillant entre deux buttoirs, et dont le socle reposerait sur une plaque de feutre épais, afin de supprimer tout bruit gênant de manipulation.

Comme observation générale, il y a lieu de remarquer qu'on opère constamment sur des courants d'induction ondulatoires qu'il est nécessaire d'isoler le mieux possible de tous les supports : les socles des transformateurs et des bobines d'induction doivent être passés à l'étuve et paraffinés : toutes les bornes où aboutissent des fils doivent être isolées par des blocs d'ébonite. Ces précautions auraient encore amélioré les résultats obtenus avec les appareils sur lesquels ont été déjà faits des essais concluants.

Ces essais ont été faits sur les lignes téléphoniques de Paris à Dijon, de Paris à Toulouse, et, en dernier lieu, de Paris à Bordeaux, en février 1898. On a pu obtenir la monophonie complète des récepteurs, c'est-à-dire la séparation de signaux ondulatoires simultanés de période différant d'au moins un demi-ton, et croiser des transmissions simultanées, en éteignant si bien les mouvements que les transmissions d'un poste tendant à produire dans les relais et les monotéléphones du même poste, que l'on a pu croiser les transmissions correspondant *à un même son*, et, que,

dès à présent, l'échange de 24 transmissions simultanées est certain.

V. — *Réglage des appareils.*

Électrodiapasons (*fig.* 4 et 5). Ces instruments sont réglés une fois pour toutes de façon à rendre un son déterminé.

Pour la pile d'entretien P*e*, deux des grands éléments-blocs indiqués plus haut suffisent pour les électrodiapasons qui vont du si_3 au mi_4. A partir du *fa* il vaut mieux en mettre trois en série.

Pour la pile de transmission P*t*, 3 ou 4 éléments sont plus que suffisants pour transmettre sur une ligne de bronze de 800 à 1000 kilomètres au moins. Dans l'appareil simplifié où la pile P*t* est supprimée, 2 ou 3 éléments suffisent pour la pile P*e* qui subsiste seule.

Il y a intérêt à ce que ces piles soient disposées de façon que le courant aille des styles S*e*, S*t*, aux plaques de platine A*e*, A*t*. Les styles s'usent alors plus lentement, malgré les étincelles d'extra-courants qui se produisent à leur point de contact avec les plaques, et le contact reste bon pendant très longtemps; il est bon de changer ce contact chaque jour en faisant tourner d'un millimètre sur elles-mêmes les plaques A*e* et A*t*.

L'instrument doit partir spontanément quand, faisant tourner A*e* à l'aide de la vis qui la supporte, on vient toucher le style S*e* : on maintient alors fortement A*e* dans cette position à l'aide du contre-écrou que porte la vis. On approche ensuite la plaque A*t* du style S*t* jusqu'à ce que les étincelles apparaissent;

on s'assure que la transmission est bonne en entendant le son d'un téléphone mis en dérivation sur les deux bouts du fil secondaire du transformateur correspondant; il faut entendre un son intense et aussi pur que possible; la présence d'un faible grincement accompagnant souvent le son, et dû à un frottement particulier du style S*t*, n'a pas d'importance, il disparaît dans la manipulation reçue au bout de la ligne. Dans l'appareil simplifié il suffit de régler l'un des styles S*e* ou S*t*.

L'appareil est ainsi réglé, et, si les piles sont en bon état, il doit fonctionner régulièrement pendant toute une journée de travail.

Transformateurs. — Ces transformateurs T, T (*fig.* 4 et 7) sont formés de deux fils isolés identiques enroulés ensemble sur une carcasse en bois renfermant un faisceau de fils de fer fin. La résistance de chaque fil est d'environ 2 à 3 ohms.

Ces instruments ne comportent aucun réglage.

Bobines de ligne et d'extinction Bl et Be (*fig.* 1, 4 et 7). Ces bobines sont de véritables *bobines d'induction*, comme on l'entend d'habitude, c'est-à-dire des transformateurs d'induction à noyau en fil de fer, dont le fil primaire est gros et court, et le fil secondaire long et fin.

Les bobines employées ici ont un fil primaire dont la résistance est de $0^{\omega},5$ le fil secondaire a une résistance de 700^{ω} environ et un coefficient de self-induction (quand le circuit du fil primaire est ouvert) de 3,36 henrys.

Cette self-induction considérable résulte du grand nombre de tours du fil secondaire, nombre nécessaire pour faire acquérir aux courants le potentiel suffisant

pour vaincre les résistances de la ligne et du poste opposé; mais elle serait fort nuisible surtout pour les courants d'arrivée.

Condensateurs de ligne et d'extinction (*fig.* 1, 4, 7). De là une première utilité des condensateurs K*l* et K*e*; mis en dérivation sur les bouts du fil secondaire des bobines B*l* et B*e*, ils détruisent presque entièrement les effets de la self-induction.

En outre, ils servent à équilibrer la self-induction qui reste dans les bobines, la ligne artificielle, les fils du relais et la ligne réelle, et à égaliser la phase des courants inverses qui arrivent à chaque instant dans les fils du relais.

Ces condensateurs sont actuellement d'un microfarad divisé en dixièmes : on leur en adjoint un autre de 0?,05 pour parfaire l'équilibre des courants. Ils suffisent pour une ligne telle que la ligne téléphonique de Paris à Bordeaux (600 kilomètres).

On les règle expérimentalement en transmettant un courant sur la ligne et prenant avec les fiches les capacités nécessaires pour éteindre les effets de cette transmission dans les récepteurs monotéléphoniques.

Il est à remarquer que le rapport des capacités de K*l* et K*e* nécessaire pour éteindre les effets d'une transmission telle que celle qui correspond à l'électrodiapason Si_3 par exemple est la même que pour toute autre dans l'intervalle extrême employé, et qui va du Si_3 au La_4 dièze. Propriété remarquable qui rend le réglage des condensateurs très simple et très facile.

Relais télémicrophonique différentiel. — Cet appareil a été ci-dessus décrit en détail, et il est repré-

senté avec ses connexions électriques sur les *fig.* 1, 2, 4 et 7.

Il doit satisfaire aux conditions suivantes :

1° Être très sensible pour les courants arrivant de la ligne nécessairement affaiblis dans leur propagation;

2° Ne pas transmettre aux monotéléphones du circuit récepteur des effets trop intenses, pour que la monophonie reste bien réalisée.

Ces deux conditions, qui semblent au premier abord contradictoires, ne le sont qu'en apparence.

En effet la sensibilité de l'appareil aux courants qui lui arrivent de la ligne dépend seulement de sa construction, et, par suite, des relations entre l'intensité du champ magnétique du noyau, la longueur des fils enroulés sur lui, la grandeur et l'épaisseur du diaphragme, et sa distance au noyau. Ces relations dont l'étude a fait l'objet de divers travaux que j'ai publiés en 1886 et 1891 (*Annales télégraphiques*, mars-avril 1886, juillet-août 1891) peuvent être étudiées à l'avance de façon à satisfaire à la première condition, indépendamment, ou à peu près, de l'usage auquel l'appareil est destiné.

La seconde condition peut être remplie au moins par deux moyens : 1° par l'inclinaison plus ou moins grande du diaphragme, obtenue par la manœuvre de la vis de réglage V, pendant qu'on envoie des courants du poste correspondant ; 2° par la variation d'intensité de la pile microphonique *pm* du relais qui peut être réduite à un seul élément susceptible d'être shunté.

L'intérêt qu'on a, au point de vue de la séparation nette des sons dans les monotéléphones, à affaiblir les courants qu'ils reçoivent, concorde d'ailleurs avec la

nécessité de la conservation d'un bon contact microphonique entre les deux charbons p et c (*fig.* 2), en évitant ainsi de faire passer des courants trop intenses par ce contact.

Ligne artificielle (*fig.* 1 et 4). — Je me sers de lignes du système de Branville-Anizan dont chacune, sous un volume restreint, peut donner l'équivalent en résistance et capacité de lignes aériennes en fer ou en bronze, à volonté, d'une longueur d'environ 500 kilomètres coupées par fragments de 50 kilomètres, ou de lignes souterraines de 50 kilomètres coupées par fragments de 5 kilomètres. Ces lignes ont été comparées à des lignes réelles; elles donnent des résultats tout à fait analogues : les communications y sont très claires et la manœuvre en est très simple: elles n'exigent aucun réglage.

Monotéléphones récepteurs. — Ces appareils sont réglés, une fois pour toutes : le son de la plaque, une fois déterminé, ne varie pas plus que celui des électrodiapasons correspondants. Ils ne comportent donc aucun réglage en cours de service, et n'exigent aucun entretien, les plaques étant recouvertes de vernis et protégées d'ailleurs par le couvercle vitré.

En résumé, parmi les appareils décrits, les transformateurs, les bobines d'induction, les monotéléphones sont indéréglables, la ligne artificielle et les condensateurs gradués sont réglés une fois pour toutes; les électrodiapasons et les relais télémicrophoniques seuls exigent une surveillance d'ailleurs très facile.

MODES D'EXPLOITATION DU MULTIPLEX.

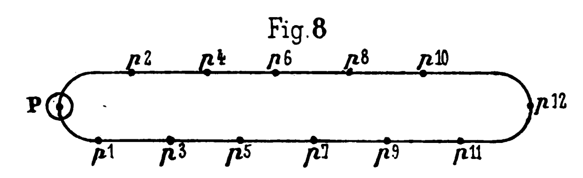
Il y en a plusieurs, dont voici les principaux :

I. — *Exploitation multiplex entre deux postes extrêmes.* — C'est le mode d'exploitation qui correspond à l'exposé du système qui vient d'être fait ci-dessus ; il est représenté schématiquement dans la *fig.* 3.

II. — *Exploitation multiplex par postes échelonnés.* — Ce mode d'exploitation peut lui-même se subdiviser en deux : [A] le cas où un poste principal communique seul simultanément avec plusieurs postes secondaires ; [B] le cas où chacun des postes doit être en relation constante et simultanée avec tous les autres.

[A] Dans le premier cas (*fig.* 8), le poste principal P renferme les 12 appareils transmetteurs et récepteurs de si_3 à *la* dièze$_4$.

Fig. 8



Chacun des postes secondaires p_1, p_2, p_3,... p_{12}, au nombre de 12, ne renferme qu'un seul appareil, à l'aide duquel il communique avec le poste principal P ; mais il ne peut communiquer avec les autres que par l'intermédiaire de celui-ci.

Si l'un des postes secondaires *p* était assez important pour comporter plusieurs transmissions simultanées avec le poste principal P, on supprimerait autant de postes secondaires qu'on voudrait ajouter de transmissions au poste *p*.

Par exemple sur un circuit Paris-Marseille, on pourrait donner une transmission avec Paris à Melun, Sens, Dijon, Chalon, Mâcon, Lyon, Valence, Avignon et 4 transmissions à Marseille.

Ou bien : une transmission à Melun, Dijon, Mâcon, Valence, Avignon; 3 transmissions à Lyon, et 4 à Marseille.

En un mot, on pourrait répartir le nombre des transmissions possibles entre le poste principal et les postes secondaires suivant leur degré d'importance, à la seule condition que la somme des transmissions *distinctes* ne dépasse pas 12.

Il est à remarquer que chacune de ces transmissions distinctes, effectuée avec l'un des appareils Si_3, Ut_4,... etc., peut être doublée (duplexée) en vertu de la réversibilité du système.

Ce mode d'exploitation pourrait être utilisé sur un long circuit, et aussi sur un circuit plus restreint entre un poste principal et des postes qui l'entoureraient, entre Paris et les principaux bureaux de la banlieue, entre un chef-lieu de département et d'arrondissement et les bureaux des cantons voisins.

[B] Cas où chacun des postes d'un même circuit doit être en communication simultanée avec tous les autres.

En ce cas, le nombre des appareils ou transmissions distincts restant toujours égal à 12, le nombre des postes p_1, p_2, p_3,... p_n desservis, qui, dans le cas précédent, pouvait aller jusqu'à 12, diminue nécessairement.

Supposons que tous les postes aient la même importance :

p_1 doit communiquer avec n-1 postes, il aura donc à effectuer n-1 transmissions;

p_2 doit communiquer avec n-1 postes; mais il a déjà une transmission avec p_1, il n'aura donc besoin que de n-2 transmissions ou appareils nouveaux;

p_3 n'aura besoin que de n-3 appareils nouveaux;

. . . .

p_n n'aura besoin que de n-n ou 0 appareils nouveaux.

Le nombre des transmissions distinctes nécessaires sera donc égal à $0 + 1 + 2 + \ldots + n\text{-}1$, et cette somme doit être égale à 12. Il en résulte qu'on a, d'après une formule connue :

$$\frac{(n-1)\,n}{2} = 12, \quad \text{d'où} \quad n = 5,4.$$

On pourra donc desservir dans ces conditions, avec 12 appareils, 5 postes échelonnés.

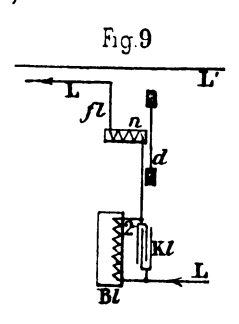
Chacun d'eux devra avoir 4 appareils distincts puisqu'il doit communiquer simultanément avec les 4 autres postes. Il est facile de voir que 10 appareils au lieu de 12 suffiraient à cet effet. Il en resterait 2 de disponibles : on pourrait les attribuer aux communications entre les deux postes principaux qui auraient ainsi entre eux 3 communications simultanées, et même 6 en utilisant la réversibilité (le duplexage).

Par exemple, on pourrait ainsi desservir les postes de Paris, Tours, Poitiers, Angoulême et Bordeaux sur le même circuit, chacun d'eux ayant 2 communications avec les autres, sauf Paris et Bordeaux qui en auraient 6 entre eux.

Installation des postes intermédiaires. — Nous avons vu, et les *fig.* 1 et 3 le montrent clairement, comment on peut installer deux postes A et B placés aux extrémités d'un circuit.

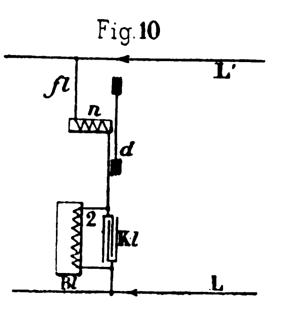
La partie du dispositif, relative au circuit de ligne seul C*l*, peut être représentée schématiquement comme l'indique la *fig.* 9 par la membrane *d* et le noyau *n* de l'électro-aimant du relais, le fil de ligne *fl* qui recouvre le noyau, le fil n° 2 de la bobine de ligne B*l*, shuntée par le condensateur K*l* et la ligne L, L′.

Installation des postes intermédiaires en embrochage (*fig.* 9). — L'idée la plus simple est d'intercaler, *d'embrocher* le circuit de ligne de chaque poste intermédiaire dans la ligne si elle est simple, dans l'un des fils L ou L′ si elle est double, en y ajoutant des dispositifs complémentaires analogues à ceux qu'on emploie en pareil cas dans la télégraphie ordinaire.



Installation en dérivation. — On peut encore placer le circuit de ligne de chaque poste intermédiaire C en dérivation sur le circuit, de plusieurs manières, par exemple :

1° En dérivation directe (*fig.* 10), l'extrémité de la bobine B*l* étant reliée directement à l'une des lignes L du circuit, et l'extrémité du fil *fl* du relais à l'autre ligne L′.



2° En dérivation indirecte ou par induction (*fig.* 11),

le circuit de ligne étant fermé sur lui-même par l'intermédiaire de l'un des fils d'un transformateur d'induction T à fils égaux et à noyau de fer.

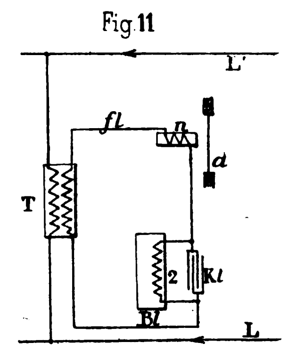


Fig. 11

Les seules précautions à prendre paraissent consister à se servir de transformateurs de résistance convenable, et à noyau de fer mobile, de façon à pouvoir faire varier, d'une façon graduée, les effets de self-induction dans le transformateur (*).

Installation en embrochage par induction (*fig.* 12 et 13). — On peut appeler ainsi un système dans lequel tous les postes A_1, A_2, A_3,... A_n ne seraient reliés au circuit général que par l'intermédiaire de transformateurs T_1, T_2, T_3,... T_n à fils égaux et à noyau de fer mobile; tous les fils primaires n° 1 des transformateurs seraient embrochés dans le circuit, et les fils secondaires n° 2 seraient dans chaque poste reliés comme l'indique la *fig.* 12 aux extrémités du fil n° 2 de la bobine B*l* et du fil *fl* du relais.

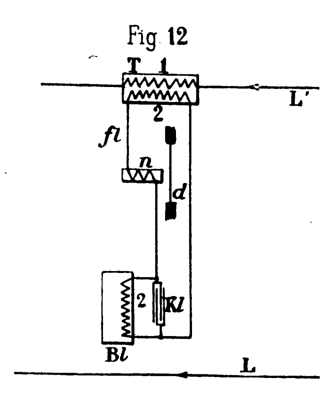


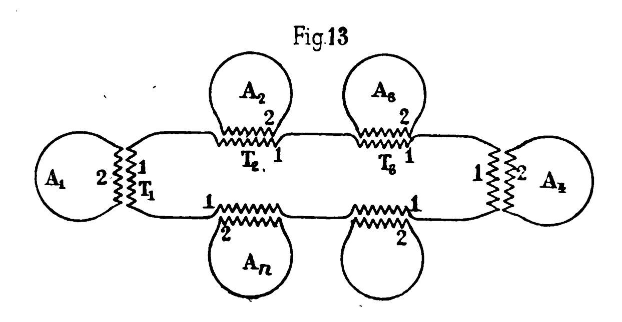
Fig. 12

Tous les postes d'un même circuit ne seraient ainsi

(*) L'expérience faite sur un circuit Paris-Bordeaux, avec le poste de Tours ainsi intercalé, a donné de bons résultats aux mois de mai et juillet 1898.

reliés au circuit que par induction; ils seraient indépendants, et rien ne les distinguerait les uns des autres au point de vue de l'installation. Toute la partie indépendante de la ligne dans l'installation de

Fig. 13



chaque poste ne serait pas changée, c'est pourquoi il est inutile de l'indiquer dans la figure schématique n° 13.

Il y a certainement d'autres modes d'installation qui pourraient être utilisés : ce que nous en disons ici suffit à montrer avec quelle souplesse le système se prête à l'emploi de dispositifs divers.

III. — *Rappel des postes.* — Le mode d'exploitation, consistant à desservir simultanément plusieurs postes sur le même circuit, soulève naturellement la question du mode d'appel de ces postes.

Il faut que cet appel puisse se faire à tout moment et entre deux quelconques des postes du circuit : il faut donc que le mode d'appel ne puisse jamais déranger le travail qui s'effectue entre les postes autres que celui qu'il s'agit d'appeler; par suite, que l'intensité des courants d'appel soit la même que celle des courants qui produisent les signaux des transmissions, et enfin que cet appel soit spécial à chaque poste.

On peut, par un moyen acoustique, y parvenir, sans

changer en rien les conditions électriques de la transmission et de la réception. On emploie (*fig.* 14) un résonateur R, c'est-à-dire un cylindre ou un prisme, percé de 2 ouvertures O et O′ sur les deux bases, et renfermant un volume d'air V tel que, lorsqu'il est ébranlé en O, il rend le même son, *ré*$_4$ par exemple, que le disque D du monotéléphone récepteur du poste qu'il s'agit d'appeler : l'ouverture O est d'ailleurs placée à une distance convenable de la partie centrale *a* du disque.

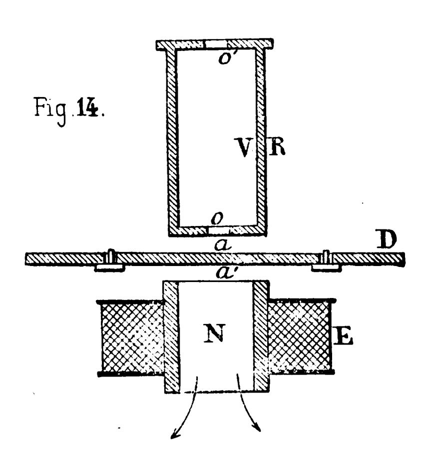


Fig. 14.

Quand on envoie au poste appelé des signaux avec le transmetteur *ré*$_4$, le disque D vibre : quand le résonateur R n'est pas placé, les ondes sonores produites au-dessus du disque par la vibration de la partie centrale *a* ne s'entendent plus à une distance de quelques centimètres ; il faut, pour recevoir les signaux (comme on l'a vu *fig.* 6), recueillir les ondes sonores au-dessous du disque, par l'intermédiaire du noyau creux N de l'électro-aimant E du monotéléphone, dans des tuyaux fixés aux oreilles ; c'est le mode de réception ordinaire.

Mais si le résonateur est placé comme l'indique la *fig.* 14, les ondes sonores produites en *a* au-dessus du disque ébranlent la masse d'air intérieure du résonateur, qui les renforce ainsi dans une proportion con-

sidérable, de 1 à 50 au moins, sans exagération. L'employé préposé à l'appareil $ré_4$, s'il en est éloigné pour un motif quelconque, peut alors entendre le son produit à une distance de plusieurs mètres.

Il suffit, pour que le fonctionnement de cette sorte *d'appel acoustique* soit assuré, que l'amplitude vibratoire du centre *a* du disque du monotéléphone soit assez grande pour produire l'ébranlement de la masse d'air V du résonateur.

L'expérience a prouvé que, dans la transmission ordinaire sur des circuits tels que celui de Paris à Toulouse, cette amplitude est suffisante, et les appels acoustiques s'entendent à plusieurs mètres de distance du monotéléphone récepteur, pourvu que le disque du monophone soit rapproché du noyau dans la position qui donne le maximum de sensibilité. Si le poste à appeler n'a qu'un seul appareil, il peut en outre sensibiliser le relais au maximum.

Le résonateur est porté par un bras fixé au socle du monotéléphone et se meut dans une glissière qui permet de rapprocher plus ou moins l'ouverture O du point *a*; il y a une distance à laquelle correspond le maximum d'effet.

Si le renforcement ainsi obtenu est jugé insuffisant, on peut le doubler au moins, en superposant au résonateur R un second résonateur identique, à une distance à peu près égale à celle du point O au point *a*.

Le signal d'appel peut d'ailleurs consister dans la transmission de la lettre indicatrice du poste appelé suivie d'un numéro s'il y a plusieurs appareils dans le poste; on achève ainsi de *caractériser* l'appel.

On pourrait employer d'autres modes d'appel fondés sur les propriétés électriques du système multiplex;

mais celui-ci a l'avantage de se superposer en quelque sorte aux organes du système, sans en gêner en rien le fonctionnement, et d'en être tout à fait indépendant.

PRINCIPAUX AVANTAGES DU MULTIPLEX.

1° Économie de temps, par suite de la *simultanéité* des transmissions *en tous les sens* qui assure une exploitation véritablement *continue* et intensive du circuit télégraphique. Sur un circuit à double fil tel que les circuits téléphoniques ordinaires, ou sur un seul fil soustrait à l'induction des fils voisins, le rendement du système complet à 12 transmetteurs peut arriver à 600 ou 700 dépêches à l'heure.

2° Économie d'argent pour plusieurs raisons : d'abord par la diminution du nombre des fils nécessaires pour desservir plusieurs postes simultanément : en second lieu, parce que les organes que le système emploie sont extrêmement simples, indéréglables, et d'un prix modique relativement aux résultats obtenus ; les frais de leur entretien sont à peu près nuls ; les éléments de pile seuls sont à renouveler de temps en temps, mais comme 3 éléments (Leclanché par exemple) suffisent par chaque transmetteur, et qu'ils ne produisent que des courants vibrants, ces éléments durent longtemps.

D'autre part, le personnel manipulant n'a besoin d'avoir qu'une instruction technique élémentaire ; il suffit qu'il sache se servir du manipulateur Morse, et lire au son les signaux Morse avec la vitesse maxima de transmission, comme on le fait couramment en

Angleterre et en Amérique et comme on commence à le faire en France.

3° Le système est applicable sur tous les circuits où le téléphone peut fonctionner, et même, alors que la transmission téléphonique peut devenir indistincte par suite d'effets de friture, ou vague par suite de la disparition des harmoniques de la voix, les signaux musicaux et rythmés du multiplex peuvent être bien reçus.

4° Le système étant basé sur l'emploi de courants induits ondulatoires rapides, il est possible de se servir simultanément du même circuit pour transmettre avec le multiplex et un autre système télégraphique utilisant des courants continus ordinaires.

5° On voit immédiatement que le mode d'exploitation par postes échelonnés indiqué ci-dessus peut être applicable avec grand avantage sur les chemins de fer, où il serait si important, au point de vue de la sécurité, qu'une station pût donner à chaque instant un avis télégraphique immédiat à une autre quelconque sur la même section, sans avoir besoin des stations intermédiaires.

6° Le principe du système est applicable à la transmission téléphonique de la parole; il permettra certainement de réaliser un mode de téléphonie réversible ou duplex.

Remarque générale. — Cet exposé du multiplex repose sur l'emploi de 12 transmetteurs et récepteurs; mais on voit par l'exposé même que ce nombre d'appareils n'est *nullement limité à* 12; il peut être augmenté sans difficulté sérieuse.

E. Mercadier.



EMPLOI DE FILS FUSIBLES

POUR PROTÉGER LES

LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES ET TÉLÉPHONIQUES

CONTRE LES

COURANTS D'ORIGINE ORAGEUSE OU INDUSTRIELLE

Dans une précédente étude, nous avons montré que l'électricité atmosphérique produisait, sur les lignes télégraphiques, des perturbations qu'on peut rapporter à deux types distincts : *décharges brusques à caractère oscillatoire et courants à variations lentes possédant les propriétés générales des courants continus.* Les paratonnerres à décharge (à plaques, à pointes ou à stries) protègent les appareils télégraphiques contre les effets destructeurs provenant de la première forme, mais sont inefficaces pour dériver les courants de la seconde espèce, qui produisent alors les signaux parasites dans les récepteurs ou les détériorent, si leur intensité est suffisamment élevée. On peut cependant, dans ce dernier cas, éviter la dégradation des appareils en provoquant la rupture automatique de la communication, en un point particulier du circuit ; il suffit pour cela d'intercaler, en ce point, un fil métallique assez fin pour qu'il se rompe lorsqu'il est traversé par un courant un peu plus faible que celui qui serait dangereux pour l'installation.

La quantité de chaleur que reçoit un conducteur de résistance r, traversé par un courant d'intensité i, est donnée par la loi de Joule, qu'on prend sous l'une des deux formes :

$$q = i^2 r t,$$

ou

$$q = \int i^2 r dt,$$

suivant qu'on peut envisager l'intensité du courant et la résistance du circuit comme constantes ou comme variables, pendant la durée considérée.

S'il n'y avait pas de refroidissement, l'accroissement de température d'un fil traversé par un courant, pendant un temps donné, serait proportionnel à cette quantité et en raison inverse de la masse et de la chaleur spécifique de ce conducteur. Le refroidissement par radiation et par conduction dépend de la surface qu'expose le fil au milieu ambiant et au contact des corps voisins, de la masse, de la chaleur spécifique et de la conductibilité de ces corps. Ces causes varient avec la forme des appareils et les circonstances accessoires et il n'est guère possible de les introduire dans une formule.

La rupture peut, suivant la nature du conducteur, provenir simplement de sa désagrégation par fusion, ou bien être la conséquence d'une véritable combustion, rendue possible par l'élévation du métal au rouge ; elle peut enfin résulter de la perte de ténacité à haute température, dans les dispositifs où le fil est soumis à une traction constante. C'est donc à l'expérience qu'il convient de s'adresser, dans chaque cas particulier, pour connaître les conditions de fonctionnement d'un coupe-circuit donné. Il convient d'ailleurs

d'interpréter avec prudence les résultats qu'elle fournit. En effet, les propriétés physiques des fils métalliques — surtout de ceux formés d'un alliage ou de ceux qui ont subi un fort écrouissage à la filière — sont susceptibles de se modifier, dans des limites assez étendues, lorsqu'on maintient ces conducteurs pendant quelque temps, à une température un peu inférieure à celle qui occasionnerait la rupture. Des transformations moléculaires s'effectuent et entraînent une variation dans la température de fusion. Certains fils qui auraient rompu nettement pour une intensité déterminée, appliquée brusquement, résistent à des courants plus puissants appliqués par gradation lente.

Si l'on considère l'ensemble formé par un électro-aimant récepteur et par un paratonnerre à fil fusible, on peut remarquer, *a priori*, que le premier appareil, formé d'un très grand nombre de tours de fil présentant une résistance totale assez élevée, se trouve dans des conditions beaucoup plus favorables que le second pour l'accumulation de chaleur. Le fil fusible atteint presque instantanément le régime permanent, tandis que l'électro-aimant n'y arrive qu'au bout de temps assez long. Si le coupe-circuit peut supporter le passage du courant pendant les premières secondes, sans atteindre la température de rupture, il résistera indéfiniment. Au contraire l'électro sera détruit, au bout d'un certain temps, si la température finit par monter au degré auquel la couverture de son fil se carbonise.

Les courants continus provenant de l'électricité atmosphérique ont une durée relativement courte ; ils paraissent, par conséquent, plutôt aptes à provoquer la rupture d'un fil protecteur qu'à porter une bobine à

une température élevée. S'il ne s'agissait que d'eux, la question de protection serait relativement simple; mais, depuis plusieurs années, les lignes télégraphiques et téléphoniques sont exposées à recevoir des dérivations de courants permanents, provenant de canalisations industrielles, amenées accidentellement en contact avec elles : l'intensité et la durée du courant perturbateur, ainsi produit, dépendent des circonstances même de l'accident; ce courant occasionnera quelquefois la rupture rapide du circuit, en un point faible; mais, d'autres fois, en raison de la résistance des lignes et des appareils ou de l'état des surfaces en contact, il pourra être faible et durer longtemps. On se trouve donc, dans la pratique, en présence de manifestations assez différentes de celles de l'électricité atmosphérique pour exiger des solutions spéciales.

I

PARATONNERRES TÉLÉGRAPHIQUES

Mode de fonctionnement du paratonnerre à bobine actuellement en usage. — Suivant le régime du coup de foudre qui frappe l'installation, le paratonnerre à bobine peut fonctionner de trois manières différentes :

1° Comme appareil à décharge, si le voltage est suffisamment élevé et si la décharge est oscillatoire, puisqu'il se compose de deux conducteurs, en relation l'un avec la ligne, l'autre avec le sol et séparés par une couche isolante mince. Dans ce genre de décharge, il y a transport métallique d'une armature sur

l'autre; cet arrachement amène quelquefois la rupture du fil fin; la perforation de l'isolant peut aussi occasionner un court circuit en un point;

2° Par combustion de la soie, lorsque le fil est porté à une température assez élevée pour carboniser l'isolant, mais insuffisante pour fondre le conducteur;

3° Par fusion du fil, fréquemment accompagnée d'oxydation et de volatilisation plus ou moins complète des résidus.

Suivant que l'appareil agit d'une manière ou de l'autre et d'après les circonstances accidentelles qui accompagnent son fonctionnement, les extrémités non altérées du fil se trouvent complètement isolées ou bien demeurent en communication entre elles, ou enfin, l'une ou l'autre sont mises à la terre; d'où il résulte, en définitive, qu'on ne sait pas si un coup de foudre aura pour effet d'isoler ou de mettre à la terre le côté de la ligne ou celui des appareils. De plus les opérateurs ne sont pas avisés du moment où se produit ce dérangement et cela peut présenter, pour les bureaux secondaires, de très graves inconvénients.

Paratonnerres mettant automatiquement à la terre. — De nombreux inventeurs ont réalisé des dispositifs dont le fonctionnement est plus régulier. Généralement la ligne est reliée au récepteur par l'intermédiaire d'un ressort et d'un fil ténu; dès que celui-ci est rompu, le ressort met la ligne en communication avec le sol et l'attention du personnel est appelée par la formation d'un signal. Ce signal consiste soit en la chute d'un indicateur optique qui était placé dans une position d'équilibre instable, mais soutenu par le fil tendu, soit dans le fonctionnement d'une sonnerie

électrique, dont le circuit est fermé après la rupture du fil protecteur.

D'ingénieuses dispositions ont été proposées récemment, dans cet ordre d'idées :

M. Queyrat, commis principal à Guéret, a réalisé un paratonnerre pour ligne simple, avec indicateur optique.

C'est également un signal optique qui apparaît dans le panneau pour bureaux centraux, étudié par M. Pomey. Utilisant presque exclusivement les robustes organes du tableau-standard, M. Pomey est arrivé à loger, dans un espace très restreint, un grand nombre de fils fusibles ; le remplacement d'un fil rompu s'effectuerait, avec la plus grande facilité, par la substitution d'une fiche à une autre.

M. Mandroux adapte à ses tableaux annonciateurs des groupes de protecteurs à fil fusible avec sonnerie indicatrice.

Enfin, les ateliers de l'administration ont réalisé, il y a plusieurs années, un système extrêmement simple qui peut être utilisé sur les lignes simples ou em-

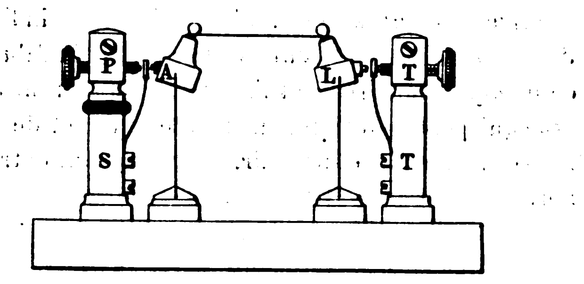


Fig. 1.

ployé à la formation d'un protecteur pour nombreuses lignes. La *fig.* 1 qui représente un de ces appareils peut dispenser d'une description.

Influence d'une relation entre le diamètre du fil préservateur et les éléments des appareils à protéger. — Les divers paratonnerres dont il vient d'être question, basés sur le même principe, se valent en théorie. En pratique, la sécurité des contacts aux points d'attache du fil ténu, la protection de celui-ci contre les chocs, la facilité de son remplacement, la solidité et le bon marché des dispositifs seront les éléments importants à considérer.

Sous réserve des avantages et des inconvénients que peut présenter, à ces divers points de vue, l'un ou l'autre de ces systèmes, il y a lieu de croire qu'en ce qui touche exclusivement leur efficacité contre l'électricité atmosphérique tous donneront de bons résultats, si le diamètre du fil préservateur est approprié à celui du fil des bobines à protéger.

On a constaté que certains appareils sont fréquemment détériorés par des perturbations électriques peu violentes : cela tient à ce qu'on ne fait guère usage que d'un seul type de fil ténu et que ce type a été déterminé pour les sonneries de 500 ohms, dont le fil est relativement gros. Le tableau ci-après indique le diamètre des conducteurs utilisés pour la fabrication de quelques appareils et l'intensité du courant *instantané* qui peut détériorer un morceau de fil de ce diamètre, suspendu dans l'air, sans tension, entre deux bornes écartées de 10 centimètres.

APPAREILS	DIAMÈTRE du fil nu	RÉSISTANCE par mètre	RÉSISTANCE totale par appareil	RÉSISTANCE par bobine	INTENSITÉ du courant instantané nécessaire pour altérer l'isolement	fondre le conducteur
Fil de cuivre.	millim.	ohms	ohms	ohms	amp.	amp.
Récepteurs téléphoniques.	0,06	6,048	variable	»	1	2
Annonciateurs Mandroux (ligne simple).	0,10	2,175	500	250	2	3
Parleur.	0,13	1,286	500	500	2,8	4
Annonciateur Postel-Vinay (appel)			200	200		
Annonciateur Mandroux (ligne bifurquée). . . .	0,15	0,967	500	250	3,5	5
Relais Baudot.			200	100		
Annonciateur Standard (appel).			100	50		
Rappel par inversion. . .	0,17	0,750	500	250	4	5,5
Hughes.			1200	600		
Morse, sonnerie télégraphique.	0,21	0,493	500	250	4,2	7
Fil de fer ténu pour paratonnerres	0,10	14,000	»	»	0,6	0,9

Ces chiffres montrent qu'un fil ténu employé dans un type d'appareil donné, un paratonnerre à bobine par exemple, est loin de présenter les mêmes garanties pour les annonciateurs et les parleurs que pour les récepteurs Morse et les sonneries. Si l'on voulait réduire le nombre des détériorations des premiers appareils, il conviendrait donc d'employer avec eux un fil protecteur plus fin.

Inconvénient des fils protecteurs très ténus. — Les fils de très petit diamètre introduits dans une installation télégraphique ou téléphonique présentent plusieurs inconvénients : *résistance*, *incertitude des contacts*, *fragilité*, *difficulté de manipulation* et enfin *interruptions fréquentes de la communication* par suite de

leur fusion. Cette dernière raison semble, au premier abord, paradoxale puisque c'est sur la fusibilité que repose la sécurité du système; elle est cependant réelle, au point de vue de l'exploitation. Il y a moins d'inconvénient, en pratique, à exposer un peu le matériel qu'à s'assujettir au remplacement très fréquent de paratonnerres brûlés. Mieux vaut cependant, et cela est presque toujours possible, éviter d'employer du fil trop fin, pour confectionner les électro-aimants. Il semble donc que c'est seulement dans cette voie qu'il faut rechercher l'amélioration du matériel, en vue d'éviter les dégradations trop nombreuses que produit, dans certains appareils, l'électricité atmosphérique.

En conséquence, nous sommes d'avis qu'il y a lieu de renoncer à employer du fil d'un diamètre inférieur à $0^{mm},17$ pour construire les électro des *appareils d'appel :* sonneries, parleurs et annonciateurs, c'est-à-dire des organes qui, de jour ou de nuit, sont presque constamment reliés aux lignes et qu'il conviendra même de recourir au diamètre de $0^{mm},20$ chaque fois qu'il n'y aura pas une raison majeure pour descendre au-dessous de cette grosseur; on sera amené, dans quelques cas, à augmenter les dimensions des bobines, mais, le plus souvent, il suffira d'utiliser leur capacité actuelle pour avoir, même avec du fil plus gros, le nombre d'ampère-tours nécessaire au bon fonctionnement des électro-aimants.

Pour les organes qui entrent en jeu au moment où les lignes sont *effectivement utilisées* : récepteurs, relais, annonciateurs de fin, téléphones, etc., il conviendra, au contraire, de ne se préoccuper que des conditions de bon rendement au point de vue du rôle

que ces organes ont à remplir et, par suite, de n'augmenter leur degré de protection envers l'orage que si aucune de ces conditions n'est sacrifiée.

Ceci posé, nous estimons que tous les dispositifs qui précèdent peuvent donner de bons résultats s'ils sont pourvus d'un fil d'un diamètre tel que, monté dans ces appareils, il rompe sous un courant instantané de $0^a,6$ à $0^a,8$.

II

PROTECTION CONTRE LES DÉRIVATIONS DES CANALISATIONS INDUSTRIELLES

Intensité du courant perturbateur produit dans une ligne télégraphique par son contact avec une canalisation industrielle. — L'intensité du courant qui traverse une installation télégraphique ou téléphonique qui vient à toucher un conducteur industriel dépend de divers facteurs : voltage de la source, résistance des conducteurs et des dérivations au point de contact, mode de retour des circuits en présence, circonstances accessoires diverses.

Au premier abord, il semble que les lignes télégraphiques unifilaires, établies au voisinage des canalisations utilisant la terre comme retour, soient seules exposées à des dérivations fâcheuses, en cas de contact des conducteurs. Il est, en effet, probable que la mise en contact, en un point, de deux circuits de faible capacité et d'isolement parfait et n'ayant, d'autre part, aucun point commun, ne présenterait pas de danger pour les appareils : mais ces conditions sont rarement réalisées ; la capacité des canalisations in-

dustrielles est assez grande et l'isolement total est presque toujours faible; le contact de deux lignes est généralement accompagné de la chute d'un des conducteurs sur le sol; de telle sorte qu'il peut se produire, du fait de la capacité ou des pertes, un courant assez intense dans l'installation télégraphique; des arcs peuvent d'ailleurs jaillir aux paratonnerres et occasionner de nouvelles communications avec le sol. On conçoit donc que les conséquences d'un contact, entre un circuit métallique fermé et une canalisation bifilaire, puissent être très variables et qu'elles ne diffèrent parfois de celles qui résultent du contact entre deux fils utilisant la terre comme retour que dans la première phase de la perturbation. Les courants de 2 ou 3 ampères qui peuvent se produire dès qu'une ligne unifilaire rencontre un fil de trolley sont relativement moins dangereux que les courants de moindre intensité qui se manifestent avec d'autres canalisations, en ce sens que les premiers sont suffisamment intenses pour faire sauter immédiatement les coupe-circuits, tandis que les autres peuvent ne pas produire cet effet et permettre aux électro-aimants de dépasser la température critique.

Pour réaliser une protection certaine, les interrupteurs doivent donc pouvoir fonctionner avec l'intensité du courant permanent qui devient dangereux pour l'installation, si sa durée est quelque peu prolongée.

Durée du courant et intensité nécessaires pour détériorer les appareils télégraphiques et téléphoniques. — Le tableau ci-après indique la durée du courant permanent nécessaire pour détruire certains organes d'appel.

DÉSIGNATION DE L'APPAREIL	RÉSISTANCE	INTENSITÉ du courant	TEMPS nécessaire à la mise hors d'usage
	ohms	amp.	minutes
Bobine de récepteur Morse ou de sonnerie	250	0,30	9
		0,37	5
Bobine de rappel par inversion	250	0,30	2
Bobine de parleur	500	0,22	10
Annonciateur Standard	100	0,26	30
		0,35	10
		0,50	4
Annonciateur Postel-Vinay	200	0,25	6

Les intensités de ce tableau ne représentent pas celles qui seraient dangereuses au bout d'une très longue durée, mais permettent de se rendre compte approximativement de leur valeur. On peut admettre qu'un courant permanent supérieur à $0^{amp},20$ ne peut être toléré impunément dans une installation télégraphique ou téléphonique. Or, les paratonnerres dont il a été parlé plus haut ne fonctionnent qu'au voisinage de 1 ampère. D'ailleurs, la combustibilité de quelques pièces entrant dans leur construction (ébonite, bois), leur position dans les bureaux au voisinage des tables de manipulation, à l'extrémité de câbles dont l'enveloppe peut être détruite par la chaleur, rendraient leur emploi dangereux, sur les fils exposés aux dérivations industrielles. Les paratonnerres à décharge eux-mêmes qui, dans ces circonstances, donnent lieu à des arcs nécessitent des précautions spéciales.

Conditions d'installation des fils fusibles.

Pour fournir le maximum de sécurité aux locaux dans lesquels ils sont installés et aux appareils placés

dans ces locaux, les coupe-circuits paraissent devoir satisfaire aux conditions suivantes :

1° Être disposés au point de raccordement des fils aériens avec les câbles ;

2° Être fabriqués avec des substances incombustibles ou utilisées de telle façon que leur combustion ne puisse occasionner d'incendie ;

3° Produire la rupture complète du circuit avant que les bobines de l'installation aient atteint la température critique.

Il est évident, d'après le tableau qui précède, que le passage de $0^{amp},25$ ou même $0^{amp},40$ pendant deux ou trois secondes n'aura aucun inconvénient pour l'installation et qu'on peut, si le système protecteur le nécessite, accorder une marge de cette durée aux organes chargés de la disjonction du fil de ligne.

Nous allons passer en revue divers moyens d'atteindre ce résultat.

Fil fusible de très faible diamètre. — On a proposé, pour la préservation du réseau téléphonique de Marseille, un coupe-circuit en fil de platine iridié. La *fig.* 2 représente cet appareil. Le fil est placé dans un tube

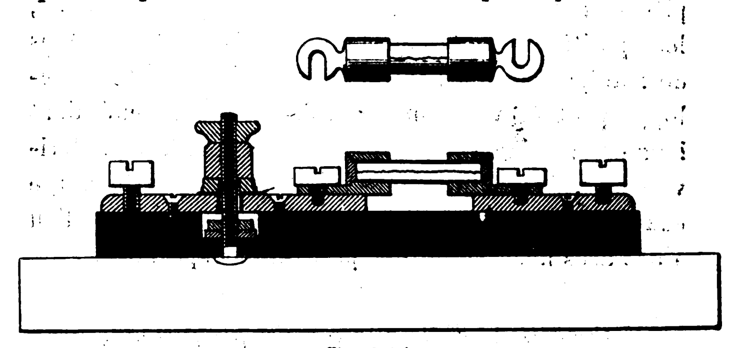


Fig. 2 (a).

de verre terminé par deux dés métalliques, prolongés par des agrafes qu'on serre sous les bornes, amenant d'une part le conducteur de ligne L et d'autre part le conducteur du poste A. Un paratonnerre à papier complète le dispositif.

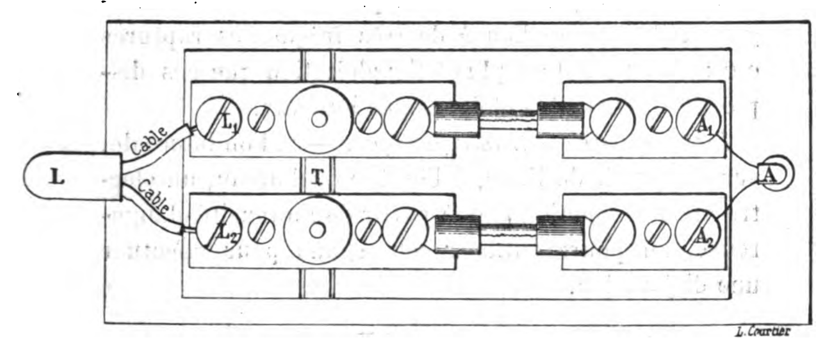


Fig. 2 (*b*).

Le coefficient de sécurité de cet appareil est évidemment d'autant plus élevé que le diamètre du fil est moindre. Un échantillon nous a donné les résultats suivants :

Diamètre	0^{mm},03
Résistance au mètre.	500ω
Résistance approximative par coupe-circuit.	25ω
Intensité amenant la rupture d'un fil placé dans le tube.	0^{amp},42

Ce dernier nombre permet de penser que le coupe-circuit sautera bien en cas de bon contact d'une ligne téléphonique unifilaire avec le fil de trolley, car l'intensité résultante dépassera 1 ampère; mais il n'est nullement certain que les choses se passeront de la même façon, dans le cas d'un circuit bifilaire. Pour obtenir une sécurité suffisante, il faudra diminuer encore la section du fil protecteur, afin de l'amener à

rompre sûrement au-dessous de $0^{amp},25$; la fragilité de ce fil et sa résistance déjà grandes seront par conséquent accrues.

Ce fil extrêmement ténu présentera d'ailleurs, au point de vue de la foudre, l'inconvénient signalé plus haut pour les paratonnerres : pendant la saison orageuse, il donnera lieu à de très fréquentes ruptures qui nuiront d'autant plus à l'exploitation que ces dispositifs seront plus éloignés des bureaux.

Interrupteur électromagnétique. — Si l'on intercale, sur chaque fil de ligne, à l'entrée du bureau, un électro-aimant fonctionnant à partir de l'intensité dangereuse, on pourra utiliser cet organe pour effectuer une disjonction.

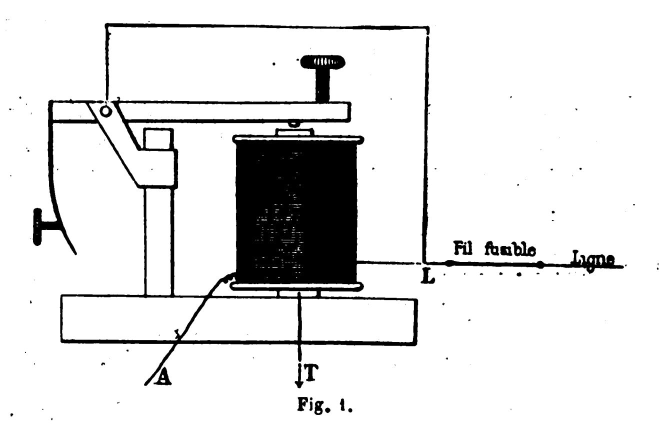


Fig. 1.

Un parleur ordinaire dans lequel la bobine a été remplacée par une autre formée de 426 spires de fil de $0^{mm},8$ commence à fonctionner sous un courant de $0^{amp},15$ et son jeu est irréprochable avec $0^{amp},25$. Une pareille bobine résisterait pendant huit minutes à un courant de 7 ampères et indéfiniment à un courant de 1 ampère.

Il n'est d'ailleurs pas nécessaire de faire passer un courant élevé pendant une longue durée dans cet appareil et il vaut mieux utiliser son fonctionnement pour faire sauter un fil fusible au moyen d'un contact instantané à la terre (*fig.* 3) ; le fil que nous choisirons, pour cet objet, sera simplement le fil de fer pour paratonnerre à bobine ou un conducteur équivalent, de sorte qu'on pourra supprimer ce dernier protecteur des tables de manipulation.

L'emploi d'un interrupteur électromagnétique semble ne présenter aucun inconvénient pour les lignes télégraphiques : la marge existant entre sa sensibilité et l'intensité des courants de travail est très suffisante ; la résistance additionnelle (1 ohm) est insignifiante, la self-induction $0^h,0112$ est également négligeable, par rapport à celle des organes d'un poste télégraphique.

Si faible que soit la self-induction d'un semblable interrupteur, comme un circuit bifilaire protégé à ses deux extrémités en comprendrait quatre, on peut craindre qu'il en résulte une diminution de la capacité de transmission téléphonique : il vaut donc mieux ne pas employer ce dispositif sur les lignes affectées à cet usage.

Protecteurs de la Western electric C°. — La compagnie américaine de construction " *Western electric C°* " a réalisé successivement divers dispositifs pour la protection des bureaux téléphoniques contre la foudre et les dérivations industrielles. Nous ne nous occuperons, ici, que de la partie de ces appareils relative au dernier objet.

M. de la Touanne a décrit dans ce recueil (*) une

(*) 3e série, t. XXI, p. 436.

première forme de protecteur utilisant une *bobine thermique* pour mettre *à la terre* un fil traversé par un courant dangereux pour l'installation. L'organe essentiel de cet appareil est un petit tube de cuivre, servant de carcasse à la bobine, sur lequel appuie un ressort-lame, tendant à le faire glisser le long d'une broche métallique le traversant suivant son axe. En temps ordinaire, ce mouvement ne peut pas se produire, parce que la broche est liée au tube par une goutte de soudure déposée dans une ouverture en forme d'entaille. Lorsque, par suite du passage du courant, la soudure fond, le tube libéré obéit au ressort et met le fil de ligne à la terre.

La durée du courant nécessaire à la production de cet effet dépend de son intensité. Voici la moyenne des résultats de plusieurs expériences :

Intensité.	Durée du passage du courant amenant la mise à terre.
$0^a,14$	∞
0 ,15	45 secondes.
0 ,16	30 —
0 ,20	20 —
0 ,22	15 —
0 ,25	7 —
0 ,30	5 —

Il convient d'ajouter que, sur 20 bobines essayées, 4 n'ont pas fonctionné, c'est-à-dire que la broche n'a pas été dégagée, même par un courant de $0^a,30$ circulant pendant 2 minutes, durée au bout de laquelle la bobine commençait à brûler.

Cet appareil est d'ailleurs incomplet, en ce sens qu'il met seulement la ligne à la terre au lieu d'opérer sa disjonction totale d'avec les annonciateurs du

bureau; la Western electric C° en a récemment modifié la construction et l'a complété par un fil fusible rompant sous un courant de 5 ampères. La *fig.* 4, qui représente l'ensemble protecteur pour poste d'abonné,

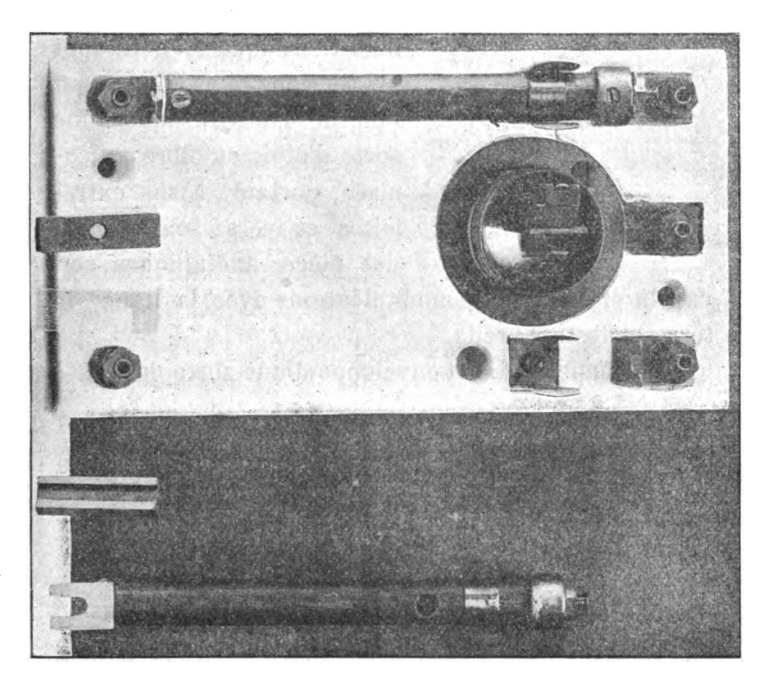


Fig. 4.

et les *fig.* 5, 6 et 7, qui indiquent divers détails, permettent de se rendre compte des transformations apportées à l'appareil primitif.

Les paratonnerres à décharge (*fig.* 5) sont encore formés de blocs de charbon c_L et c_T séparés par un mica découpé M, mais ils sont recouverts d'une calotte métallique à vis (non figurée) qui les met à l'abri des chocs et de la poussière; le ressort l est relié à une

sorte de fourchette élastique *f* qui embrasse une bague de laiton D, communiquant au fil de ligne par la carcasse de la bobine thermique.

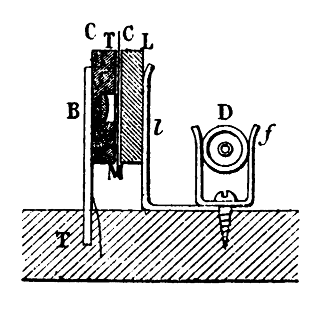


Fig. 5.

Le coupe-circuit et la bobine thermique (*fig.* 6) sont placés dans le prolongement l'un de l'autre, dans une sorte d'étui, en fibre vulcanisée, portant, à ses extrémités et vers son milieu, des pièces métalliques servant à prendre les communications avec la ligne, la terre et les appareils.

Le fil fusible GL est enveloppé d'une sorte de tresse

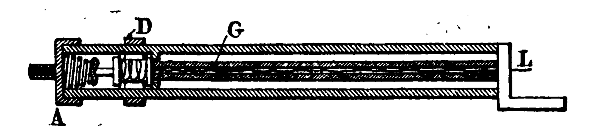


Fig. 6.

d'amiante, destinée à recueillir les produits de la fusion en vue d'éviter l'inflammation de l'étui, au cas où un arc viendrait à se produire momentanément.

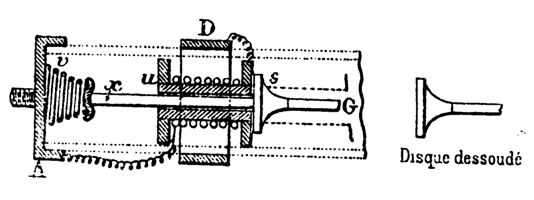


Fig. 7.

La bobine est formée d'un petit tube de laiton *u*, à une extrémité duquel s'adapte un minuscule disque *s*

de même métal, fixé normalement au tube par une goutte de soudure. Une broche en verre *x* traversant la bobine, suivant son axe, et reposant sur un ressort à boudin tendu *v*, placé au fond du tube, appuie constamment sur le petit disque métallique. Si la soudure vient à fondre, la broche, poussée par le ressort, détache le disque et le chasse devant elle.

Or, une extrémité du fil de la bobine communique à la pièce de sortie A, tandis que l'autre extrémité est reliée à la carcasse; d'autre part, le fil fusible est tendu entre le petit disque et le bloc de ligne. En temps ordinaire, le courant venant de la ligne circule donc par le fil fusible, le disque, la carcasse, le fil de la bobine thermique, la pièce A et de là se rend aux annonciateurs. Lorsque la bobine thermique, échauffée d'une manière anormale, amène la fusion de la soudure, le disque est détaché et projeté par la poussée de la broche et la communication est rompue.

Enfin, un courant instantané très intense pourrait également disjoindre la connexion de la ligne aux appareils, non plus par suite du fonctionnement de la bobine, mais par rupture du fil fusible.

Le mode de liaison du disque à la bobine est bien préférable à celui de la broche métallique de la disposition précédente : il n'y a plus lieu de redouter que quelque aspérité s'oppose au dégagement de la pièce après fusion de la soudure. Cependant le guidage de la broche de verre est encore insuffisant : il peut arriver, en effet, que celle-ci fasse seulement pivoter le disque sur lui-même et le coince, dans une position telle qu'il touche encore, par sa tranche, la carcasse de la bobine et rende, par suite, la protection illusoire. Sur une trentaine d'appareils essayés,

nous avons ainsi constaté trois ratés, bien que le courant ait toujours amené la libération du disque.

Une variante de ce modèle, ne présentant pas ces inconvénients, est utilisée dans quelques réseaux téléphoniques de Suisse. La broche en verre est remplacée par une pièce d'ivoire pourvue d'une portée sur laquelle s'applique le ressort à boudin (*fig.* 8); la pres-

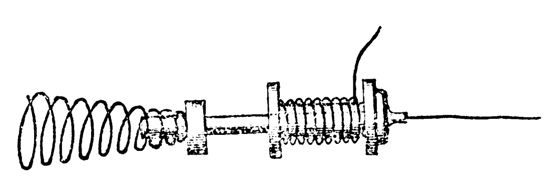


Fig. 8.

sion transmise de cette façon est beaucoup plus régulière et la broche ne dévie pas; vingt appareils de ce modèle que nous avons essayés ont fonctionné régulièrement. Ce dispositif est réalisé sous des dimensions un peu plus restreintes que le précédent; l'étui contenant la bobine thermique et le fil fusible ne mesure que 6 centimètres, tandis que la longueur du premier appareil est de 12 centimètres. Le fil fusible est plus fin : il doit fondre sous un courant de 2 ampères, il n'est d'ailleurs pas enveloppé d'amiante. Ce protecteur peut être utilisé, soit dans les postes d'abonnés, soit dans les bureaux centraux.

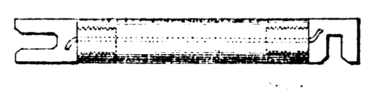


Fig. 9.

Pour ces dernières installations, on emploie aussi, en Suisse, des organes protecteurs séparés : d'une part le fil fusible de 2 ampères, tendu dans un tube de fibre, entre deux agrafes servant à prendre la

communication (*fig.* 9); d'autre part, la bobine thermique, réduite à sa plus simple expression (*fig.* 10). Le petit disque est pourvu d'un appendice terminé par un bouton qui permet de l'engager dans la fourchette d'un ressort-lame; un bouton semblable, fixé au corps de la bobine et relié à l'entrée du fil, peut également s'engager dans une seconde fourchette. L'une des fourchettes est reliée à la ligne, l'autre à l'appareil et leurs ressorts tendent à s'écarter. Cette tendance a pour effet de produire la disjonction du circuit de ligne, lorsque la bobine fonctionne.

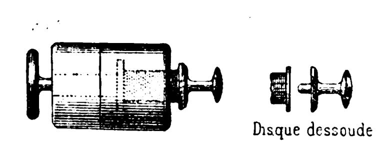


Fig. 10.

Cette séparation des organes est avantageuse. En effet, les bobines thermiques ne sont pas construites de manière à être réparées; aussi, lorsque l'une d'elle a fonctionné ou est devenue défectueuse, pour un motif quelconque, il n'y a qu'à l'abandonner, et cela, qu'elle soit séparée ou qu'elle fasse partie d'un tube contenant un fil fusible; dans ce dernier cas, le coupe-circuit devient lui-même sans valeur.

Cette manière de procéder est justifiée, dans une certaine mesure, par le bon marché de ces organes, mais l'impossibilité de démonter et, par suite, de visiter l'appareil sans le mettre hors d'usage, présente des inconvénients. On ne peut se rendre compte du degré d'efficacité de ces organes qu'en procédant à la destruction d'un certain nombre par le courant qui doit les faire fonctionner, et en déterminant la proportion des ratés.

Protecteur basé sur la dilatation. — C'est en vue de remédier à ces inconvénients que nous avons réalisé le dispositif suivant, basé non plus sur la fusion produite par une bobine thermique, mais par la dilatation d'une mince tringle métallique, entourée d'une spirale de fil de maillechort recouvert de soie et intercalée dans le circuit, entre la ligne et les appareils à protéger. On aurait pu utiliser la dilatation de cette tringle pour rompre directement le circuit de la ligne, mais il a paru plus prudent de l'employer à établir une communication momentanée de cette ligne avec la terre, et de profiter de l'augmentation d'intensité sur le circuit de ligne qui résulte de cette manœuvre, pour amener la fusion d'un fil, placé en deçà de cet organe. De cette manière, la communication métallique entre la ligne et les appareils du bureau demeure établie dans de bonnes conditions, et le fonctionnement accidentel du dispositif, sous une cause étrangère à une dérivation industrielle, ne produit que la mise à terre momentanée d'un point du circuit. Ce dispositif est représenté schematiquement par la *fig.* 11.

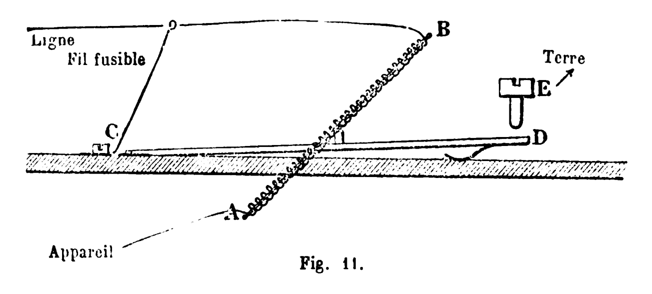


Fig. 11.

La tringle est un fil de zinc AB de $0^{m},12$ de longueur et de $0^{mm},8$ de diamètre; elle est fixée, par ses extrémités entre deux écrous qui s'opposent à tout

déplacement longitudinal ; vers son milieu s'appuie un levier léger CD, fixé à son extrémité C par une lame flexible et qu'un ressort D, placé à son autre extrémité, tend à soulever, de manière à l'amener sous une vis butoir *E* ; les choses sont disposées de telle sorte que le levier soit arrêté à quelques millimètres du butoir tant que la tringle AB reste droite, mais qu'il puisse l'atteindre si celle-ci vient à se courber, sous l'effet combiné de la dilatation et de la poussée du ressort D.

La tringle demeure d'ailleurs rectiligne tant qu'elle n'est pas échauffée par le passage d'un courant anormal ; le courant du travail est insuffisant pour produire ce résultat et les variations de la température ambiante sont sans action, parce qu'elles sont compensées par un écartement identique des écrous ; tout l'appareil est en effet supporté par une règle de zinc d'une épaisseur suffisante pour qu'elle soit rigide. La résistance du fil et l'écartement de la vis butoir sont déterminés de telle sorte que le levier vienne au contact lorsqu'un courant de $0^{amp},20$ circule pendant quelques secondes. Avec les dimensions données à l'appareil, il suffit, pour cela, que le fil ait une résistance de 20 ohms.

La *fig.* 12 représente l'ensemble du protecteur, comprenant un *bloc à vis* L, pour attacher le fil de ligne, un *coupe-circuit* à fil fusible F ; un *paratonnerre à décharge* P ; le *dispositif à dilatation* AB et, enfin, un second *bloc* N pour fixer le câble allant au bureau. Le tout est monté sur une règle de zinc, mesurant $0^{m},42$ de longueur sur $0^{m},08$ de largeur et portant sur la face opposée une série d'organes semblables destinés à un second fil.

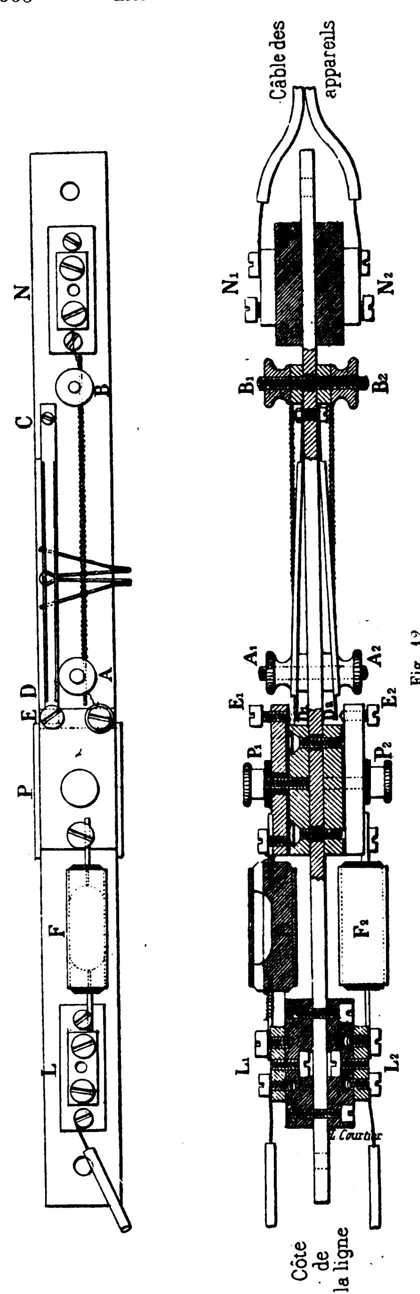


Fig. 12.

Le coupe-circuit est formé d'un fuseau de fibre vulcanisée, évidé vers son milieu, et pourvu d'un goujon métallique à chaque extrémité ; une rainure longitudinale sert au logement du fil qui, pour la sécurité de la continuité électrique du circuit, est soudé aux deux goujons ; un étui métallique recouvre le tout, pour éviter la projection de particules incandescentes, lors de la fusion du coupe-circuit. Le fil choisi à cet effet est le fil de fer pour paratonnerres, brûlant sous un courant de $0^{amp},8$.

Le paratonnerre à décharge se compose de deux plaques rectangulaires de laiton, soi-

gneusement polies sur une face, et séparées par une feuille de mica évidée ; la plaque inférieure est fixée à la règle de zinc, qui communique elle-même à la terre par les supports ; la plaque supérieure porte deux vis de serrage destinées à recevoir : la première, un goujon du coupe-circuit ; la seconde, une extrémité de la spirale thermique ; une troisième vis, à pointe platinée, traverse cette même plaque et constitue le butoir E du levier de l'appareil à dilatation.

L'autre extrémité de la spirale thermique est serrée sous une vis de bloc de sortie.

L'ordre dans lequel ces organes ont été groupés n'est pas arbitraire : on a placé en tête, du côté de la ligne, le coupe-circuit, afin qu'il puisse rompre la communication dès qu'un danger se présente : par exemple, s'il se produisait un arc ou un court-circuit au paratonnerre. Il convient d'ailleurs de remarquer que, par le choix de son diamètre, ce fil peut également se rompre si la ligne est traversée, en cas d'orage, par un courant un peu intense.

La spirale thermique a été placée après le paratonnerre à plaques, pour qu'elle soit protégée, s'il se produit un court-circuit entre les armatures et pour que, par son impédance, elle facilite, en cas de décharge orageuse, le fonctionnement de ce paratonnerre.

Mode d'installation. — Ces protecteurs ont été étudiés spécialement en vue des bureaux centraux téléphoniques ou, plus exactement, pour le raccordement des lignes aériennes exposées aux dérivations industrielles, avec les câbles qui les prolongent, que ce prolongement comporte seulement les fils descen-

dant au bureau central, si le réseau est entièrement aérien, ou qu'il comprenne des lignes souterraines, dans le cas d'un réseau mixte.

Les protecteurs doivent être établis aussi près que possible des fils aériens et on devra prendre soin de disposer les câbles de raccordement de telle sorte qu'ils ne puissent eux-même devenir une cause d'incendie de l'immeuble, par suite d'un échauffement anormal.

La pièce dans laquelle seront installés ces appareils devra être pourvue d'une aire carrelée ou bétonnée plutôt que d'un parquet; les parois et le plafond seront recouverts d'un enduit et non constitués par des panneaux de bois.

Les protecteurs seront disposés en rangées verticales sur les montants d'un châssis en fer, du genre de ceux qu'on emploie pour les répartiteurs; ce support sera accessible sur ses deux faces; d'un côté il recevra les fils de ligne, de l'autre les câbles descendants. Un écartement d'axe en axe de $0^{m},12$ en largeur et de $0^{m},7$ en hauteur semble suffisant; il en résulte que l'on peut loger 112 lignes bifilaires par mètre carré. Il y aura intérêt, lorsque la chose sera possible, à fermer l'appareil, au moyen d'un rideau métallique ou de portes légères en fer.

Vérification. — L'appareil à dilatation se prête à une vérification facile, sans endommager le coupe-circuit, ni même détacher les communications. Il suffit de vérifier que le passage d'un courant de $0^{amp},20$ établit avec sécurité le contact au butoir D, au bout de quelques secondes. Le diagramme de la *fig.* 13 montre comment, avec quelques éléments de

pile, un milliampèremètre et un parleur, on peut procéder à cette vérification.

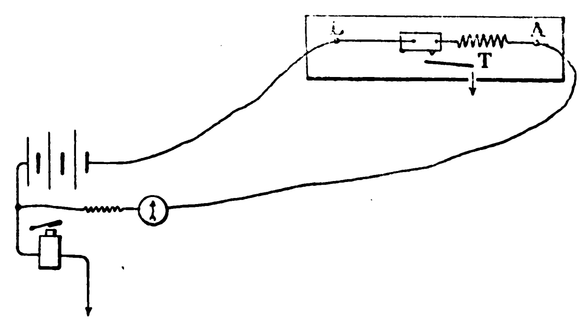


Fig. 13.

La pile est choisie de telle sorte qu'elle fournisse sur la spirale thermique le courant voulu ; une petite résistance additionnelle permet, en cas de besoin, d'obtenir ce résultat, qu'on contrôle à l'ampèremètre ; le parleur est relié, d'une part à la terre, d'autre part à la pile. Toute cette installation est disposée sur une table auxiliaire, devant laquelle se tient un agent ; un aide touche, au moyen de deux fils volants, les bornes extrêmes L et A du protecteur ; l'ampèremètre indique le passage du courant, le parleur annonce le moment où le levier vient en contact avec la vis butoir. En cas de mauvais fonctionnement, on peut régler celle-ci ou remplacer l'appareil.

Les coupe-circuits se réparent à l'atelier, la salle des protecteurs doit être pourvue d'un approvisionnement suffisant de ces objets pour que les fils brûlés puissent être remplacés sans perte de temps.

Conclusions. — L'appareil décrit en dernier lieu nous a donné des résultats très satisfaisants dans des

essais de laboratoire, mais n'a pas encore été mis en service; il convient donc de réserver, pour l'instant, toute appréciation, au sujet de son efficacité. Les divers protecteurs de la *Western électric C°* sont déjà d'un usage très répandu. Dans toutes les villes où ils sont installés, ils fonctionnent très fréquemment, ce qui prouve que le danger que présentent les canalisations électriques est très grand: le plus souvent, ces protecteurs suffisent; cependant quelques incendies, survenus récemment chez les abonnés ou dans les bureaux centraux, corroborent les résultats expérimentaux cités plus haut et montrent qu'on ne peut, jusqu'à présent, accorder une confiance absolue à ces appareils.

Il convient donc de ne les considérer que comme des compléments de sécurité qui ne dispensent d'aucune des précautions principales et le constructeur devra surtout avoir en vue d'éviter les chances de rencontre des canalisations électriques et des lignes télégraphiques ou téléphoniques.

J. VOISENAT.

NOUVELLE MÉTHODE POUR LA MESURE DE L'INTENSITÉ DES CHAMPS MAGNÉTIQUES (*)

---

1. — Le phénomène auquel j'ai recours est l'induction réciproque de l'action électromagnétique employée par M. Lippmann dans son galvanomètre à mercure. Un liquide conducteur, qui peut être de l'eau de rivière, s'écoule normalement aux lignes de force du champ à mesurer. On détermine à l'aide de l'électromètre capillaire la force électromotrice induite entre la face supérieure et la face inférieure de la veine. Connaissant le débit, on en déduira l'intensité du champ.

Supposons, pour simplifier, la vitesse d'écoulement uniforme sur toute la section d'une veine rectangulaire d'épaisseur e dans le sens des lignes de force, de hauteur l dans la direction normale, à la fois, aux lignes de force et à la vitesse d'écoulement. On peut assimiler la veine à un élément mobile de conducteur de longueur l. La force électromotrice induite a pour valeur :

$$E = Hvl, \tag{1}$$

H désignant l'intensité du champ.

(*) *Journal de Physique*, extrait d'un Mémoire plus étendu publié dans *l'Éclairage électrique*, avril 1898.

Le débit est :

(2) $$D = evl.$$

On tire de là :

(3) $$H = \frac{Ee}{D}.$$

Telle est la formule très simple que l'on devra appliquer.

2. — Cette même formule subsiste encore si la vitesse v varie avec deux coordonnées x et y, respectivement parallèles à l'épaisseur e et à la hauteur l, à la seule condition que les électrodes rectangulaires, de longueurs égales ou inégales, occupent toute la largeur e de la veine; il n'est pas nécessaire qu'elles soient placées en face l'une de l'autre.

Pour démontrer cette proposition, nous nous appuierons sur la réciprocité de l'induction et du travail électromagnétique. Considérons un courant auxiliaire d'intensité totale égale à l'unité, traversant la veine d'une électrode à l'autre. La force électromotrice à calculer est égale au travail électromagnétique exécuté par seconde sur le courant en vertu du mouvement de la veine.

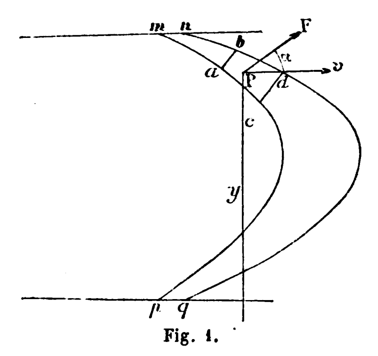


Fig. 1.

Considérons un tube de flux élémentaire $mnpq$ (*fig.* 1) allant d'une électrode à l'autre. Soit I l'intensité du courant auxiliaire au point P. Détachons autour de ce point un élément $abcd$ du tube, de section dS, de longueur ds. La force électro-

magnétique F, normale à l'axe du tube, est $\mathrm{H}\mathrm{I}d\mathrm{S}ds$ et fait un angle α avec la direction de la vitesse v. L'élément correspondant de travail électromagnétique par seconde est $\mathrm{H}\mathrm{I}d\mathrm{S}dsv \cos \alpha$; ou, en désignant par y l'ordonnée du point P, $\mathrm{H}\mathrm{I}d\mathrm{S}vdy$. Pour le tube entier, $\mathrm{I}d\mathrm{S}$ est une constante égale à $\mathrm{I}_0 d\mathrm{S}_0$: I_0 désigne l'intensité, $d\mathrm{S}_0$ la section du tube au voisinage immédiat de l'électrode. Le travail par seconde relatif au tube entier est donc :

$$d^2\mathrm{E} = \mathrm{H}\mathrm{I}_0 d\mathrm{S}_0 \int_0^l v\,dy.$$

Remarquons maintenant que, d'après les données du problème, les lignes de flux sont des courbes planes parallèles aux faces terminales de la veine. Considérons une tranche d'épaisseur dx et de longueur indéfinie dans le sens de l'écoulement. Soit a la longueur de l'une des électrodes. Le travail par seconde relatif à la tranche entière est la somme des travaux relatifs aux divers tubes contenus dans cette tranche.

$$d\mathrm{E} = \mathrm{H}\int_0^a \mathrm{I}_0 d\mathrm{S}_0 \int_0^l v\,dy.$$

Or, la vitesse v n'étant, par hypothèse, fonction que de x et de y, l'intégrale $\int_0^l vdy$ est constante pour tous les tubes considérés et peut être mise en facteur. D'autre part, la distribution du courant auxiliaire est la même dans toutes les tranches; $\int_0^a \mathrm{I}_0 d\mathrm{S}_0$ est donc la fonction $\frac{dx}{e}$ de l'intensité totale, supposée égale à 1, ainsi :

$$d\mathrm{E} = \frac{\mathrm{H}\,dx}{e} \int_0^l v\,dy.$$

Pour avoir E, il suffit maintenant d'intégrer par rapport à x de 0 à e

$$(4) \qquad E = \frac{H}{e}\int_0^e\int_0^l v\,dy\,dx.$$

Telle est l'expression de la force électromotrice induite.

D'ailleurs, le débit D est, par définition :

$$(5) \qquad D = \int_0^e\int_0^l v\,dy\,dx.$$

Donc en définitive :

$$(3) \qquad H = \frac{Ee}{D}.$$

Nous retrouvons la formule (3) dans des conditions assez générales pour pouvoir en faire usage avec des veines rectangulaires quelconques.

3. — Il reste à savoir quelle relation il y a entre les forces électromotrices induites E et les différences de potentiel V que l'on mesure à l'aide de l'électromètre.

S'il n'y a pas de dérivation extérieure entre les électrodes et qu'on puisse faire abstraction des courants de Foucault, on a évidemment :

$$(6) \qquad V = E.$$

On calculerait aisément l'effet d'une dérivation extérieure connue; mais il est plus difficile de tenir compte des courants de Foucault.

Considérons d'abord le cas où la vitesse v d'écoulement est uniforme. Par raison de symétrie, les courants de Foucault devraient avoir même direction et même intensité en tous les points de la veine, ce qui exige que cette intensité soit nulle. Alors la face

supérieure et la face inférieure de la veine sont des surfaces équipotentielles ; la force électromotrice induite en chaque point est équilibrée par une force électrostatique égale et contraire provenant de l'électricité distribuée sur ces faces, et l'on a rigoureusement :

$$V = E. \tag{6}$$

Pratiquement, j'ai employé des veines rectangulaires dans lesquelles les vitesses v ne varient qu'en vertu du frottement contre les parois. Si les deux dimensions l et e du rectangle $abcd$ (*fig.* 2) ne sont pas trop petites, on peut décomposer la veine en deux régions, l'une intérieure $ghki$ dans laquelle la vitesse peut être considérée comme constante, l'autre d'épaisseur ε, au voisinage des parois, où la vitesse décroît rapidement jusqu'à o.

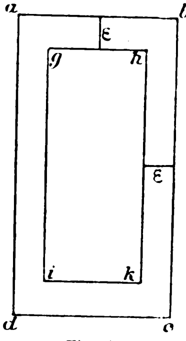


Fig. 2.

Si l'on pouvait supprimer cette couche-enveloppe, on aurait rigoureusement $V = E$. En réalité, avec des électrodes occupant la largeur entière e, on aura toujours $V < E$, mais l'importance relative de la couche perturbatrice diminue toujours quand e augmente ; l'inégalité se rapprochera asymptotiquement de l'égalité rigoureuse qui ne sera réalisée qu'à la limite.

Pour transformer en égalité l'inégalité

$$H = \frac{Ee}{D} > \frac{Ve}{D},$$

et réaliser la condition d'égalité-limite de E et de V,

il suffira d'augmenter l'épaisseur e d'une quantité α constante :

$$H = \frac{V(e+\alpha)}{D}. \tag{7}$$

4. — Pour déterminer la forme de la veine, j'ai employé des ajutages ou cuvettes en ébonite de construction assez robuste pour pouvoir résister, sans fuite latérale et sans déformation, à une charge de 20 mètres d'eau au moins. Deux électrodes de cuivre occupant, sur une largeur de 1 centimètre environ, toute la largeur de la cuvette, arasent exactement la face supérieure et la face inférieure de la veine.

D'après les formules établies ci-dessus, la force électromotrice induite est indépendante de la nature du liquide conducteur. J'ai pris d'abord des solutions concentrées ou étendues de sulfate de cuivre, formant avec les électrodes de cuivre un système impolarisable; mais, dès les premières mesures, on a pu constater que la valeur mesurée de la force électromotrice correspondant au renversement d'un champ donné se montre rigoureusement indépendante de la concentration du liquide électrolytique; si bien que, sans rien changer à la disposition de l'expérience, j'ai pu substituer au sulfate de cuivre l'eau même des conduites de la ville; la facilité des mesures est restée la même. La polarisation des électrodes n'introduit aucune perturbation.

Dès lors, j'ai toujours opéré avec de l'eau. En faisant usage d'un réservoir muni d'un trop-plein et que l'on alimente surabondamment, on obtient des vitesses d'écoulement rigoureusement invariables, et le débit

d'une cuvette donnée n'est limité que par la hauteur de chute dont on dispose; la sensibilité de la méthode est, comme on le voit par la formule (3), proportionnelle à ce débit.

J'ai fait usage de vitesses moyennes variant de 50 centimètres à 17 mètres et vérifié sur un grand nombre de cuvettes, les unes rectangulaires, les autres quelconques, la proportionnalité rigoureuse de la force électromotrice à la vitesse prévue par la formule (1).

5. — Si l'on ne veut effectuer que des mesures relatives, on pourra donc attribuer à la cuvette qui sert de support aux électrodes telle forme particulière qu'imposeront les circonstances. Une seule précaution est indispensable, c'est l'*isolement rigoureux des électrodes.* La moindre dérivation entre les électrodes se produisant à l'extérieur de la cuvette serait nuisible, eu égard à la grande résistance spécifique du liquide qui s'écoule; elle pourrait altérer notablement les mesures.

6. — Pour faire des mesures absolues, il est nécessaire de savoir jusqu'à quel point les conditions théoriques imposées pour l'établissement de la formule (3) sont réalisées dans la pratique. En particulier, *les vitesses en tous les points de la veine doivent être rigoureusement parallèles*, ce qui ne peut avoir lieu qu'à une distance du tube d'amenée suffisante pour qu'il n'y ait plus de remous. Des expériences de comparaison, faites avec des cuvettes à électrodes multiples, ont montré toute l'importance de cette cause d'erreur dans les cuvettes très plates : ainsi, avec une cuvette de 6 centimètres de haut et de $1^{mm},15$ d'épaisseur, les différences de potentiel obtenues, dans un

même champ, pour trois couples d'électrodes placées respectivement à 2 centimètres, 5 centimètres et 8 centimètres du tube d'amenée ont été entre elles comme les nombres 0,7, 0,925 et 1 ; tandis que pour une autre cuvette de même longueur totale de 1 centimètre de haut et de $6^{mm},56$ d'épaisseur, munie de quatre couples d'électrodes, les trois couples les plus éloignés du tube d'amenée ont donné des différences de potentiel égales, le premier couple seul, une force électromotrice inférieure de $\frac{1}{20}$.

7. — J'ai aussi comparé les différences de potentiel données, dans un même champ, par toute une série de cuvettes rectangulaires de hauteur et d'épaisseur différentes. Les valeurs du champ calculées par la formule (3) ne sont pas rigoureusement identiques. On rétablit l'égalité, en substituant à l'épaisseur e mesurée une épaisseur fictive un peu plus grande $e + \alpha$, formule (7). Pour toutes les cuvettes d'épaisseur supérieure à 1 millimètre, j'ai trouvé pour α une valeur identique $\alpha = 0^{mm},13$; mais pour des épaisseurs moindres il faudrait donner à α des valeurs d'autant plus grandes que l'épaisseur e serait elle-même plus petite.

Des causes multiples suffisent à expliquer ce désaccord apparent de la formule (3) et de l'expérience : courants de Foucault déjà invoqués, dérivations extérieures, irrégularités d'épaisseur de la cuvette, influence du tube d'amenée ou de la veine libre, etc. Tout ce que l'on peut dire *a priori* de ces diverses causes, c'est que leur effet relatif sera d'autant moindre que la veine sera plus épaisse et par conséquent que les vitesses seront plus près d'être uniformes dans

toute son étendue, ce qui est bien conforme à l'observation.

8. — Pour déterminer l'épaisseur fictive qui permettra d'appliquer la formule (3) à une cuvette quelconque, rectangulaire ou non, le procédé que l'on doit recommander de préférence consiste à employer un champ d'intensité connue, tel que celui d'une bobine sans fer doux.

Soit PQ (*fig.* 3) la ligne des électrodes de la cuvette disposée perpendiculairement à l'axe COX de la bobine à une distance a de son centre. Au milieu O de PQ, le champ est dirigé suivant OX; en un point M, à la distance y, très petite, de O, la composante du champ parallèle à l'axe est :

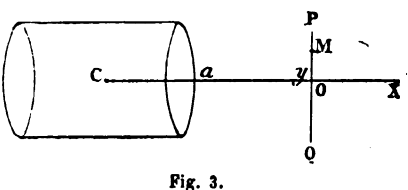


Fig. 3.

$$X = A_0 + A_2 y^2, \tag{8}$$

par unité du courant, à des quantités près de l'ordre de y^4. A_0 et A_2 sont des constantes connues qui dépendent des dimensions de la bobine et de la distance a (*). Le champ moyen d'où résulte la force électromotrice est :

$$H = \frac{2i}{l}\int_0^{\frac{l}{2}} X dy = i\left(A_0 + A_2 \frac{l^2}{12}\right). \tag{9}$$

cette formule n'est applicable que si l est notablement inférieure à la plus courte distance d'un point quel-

(*) Voir Mascart, *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, t. II, p. 110.

conque de PQ à la spire de la bobine la plus rapprochée.

Inversement, on pourra appliquer les formules (3) ou (7) à la mesure de l'intensité d'un courant, en faisant usage d'une bobine et d'une cuvette connues, dont l'ensemble constituera un ampèremètre de nouvelle espèce.

9. — Il reste à indiquer la sensibilité pratique de la nouvelle méthode de mesure de l'intensité des champs magnétiques. Mon électromètre permet, à la limite, de constater l'existence d'une force électromotrice de $\frac{1}{20000}$ de volt, et si l'on fait usage de l'inversion du champ, de $\frac{1}{40000}$ de volt ou, en valeur absolue électromagnétique, de $2,5.10^3$ C. G. S.

La plus grande vitesse moyenne que j'ai employée est de 17 mètres, et la cuvette la plus sensible avait 6 centimètres de haut; d'après la formule (1), on a :

$$H = \frac{E}{vl},$$

et la plus petite valeur du champ magnétique qu'il fût possible de déceler était :

$$H = \frac{2,5.10^3}{1700.6} = 0,25 \text{ C. G. S.}$$

Il ne semble pas qu'il y ait de difficultés sérieuses à aller encore plus loin.

10. — Pour des applications où la sensibilité de la méthode électrométrice paraîtrait exagérée, on pourrait faire usage d'un condensateur de grande capacité que l'on chargerait, à l'aide de la force électromotrice à mesurer, et qu'on déchargerait sur un bon galvano-

mètre balistique. Avec une capacité *industrielle* de 10 microfarads, la cuvette de 6 centimètres et la vitesse de 17 mètres, on mettrait en évidence des champs de 5 C. G. S.

11. — J'indique ailleurs avec quelques détails (*) les applications que j'ai tentées jusqu'ici : graduation d'un ampèremètre, étude de la courbe de saturation d'un électro-aimant, mesure de la quantité absolue de magnétisme et détermination des pôles d'un aimant.

Je me bornerai à dire quelques mots de ce dernier problème. Soit un pôle austral de masse m placé à la distance a du milieu 0 de la ligne des pôles PQ d'une cuvette, sur une perpendiculaire à son plan (*fig.* 4). En un point situé à la distance y de l'axe AO, la composante utile du champ est $\frac{m}{a^2+y^2}\frac{a}{\sqrt{a^2+y^2}}$. Le champ moyen utile est donc :

Fig. 4.

$$H = \frac{2ma}{l}\int_0^{\frac{l}{2}} \frac{dy}{(a^2+y^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{m}{a\sqrt{a^2+\frac{l^2}{4}}}.$$

Quand on a fait usage d'un barreau suffisamment long, disposé perpendiculairement et à peu de distance de la cuvette, le deuxième pôle n'intervient que par un terme correctif peu important. Soit L, la longueur de l'aimant, x la distance d'un pôle à l'extrémité voisine, b la distance de l'extrémité de l'aimant

(*) *L'Éclairage électrique*, avril 1898.

au centre de la cuvette, on a pour le champ moyen total, avec une approximation suffisante,

$$H = m \left[\frac{1}{(b+x)\sqrt{(b+x)^2 + \frac{e^2}{4}}} - \frac{1}{(L+b-x)^2} \right].$$

On fera varier b et l'on déterminera m et x de façon à satisfaire le mieux possible à l'ensemble des observations.

Je crois devoir citer un tableau d'expériences, à cause de la petitesse des champs moyens étudiés, et on jugera par cet exemple délicat de la précision moyenne des mesures courantes. Le barreau, pris dans une boîte ordinaire d'aimants, avait 35 centimètres de long, 2 centimètres de large et 8 millimètres d'épaisseur. En faisant $x = 2^{cm},65$, $m = 629$ C. G. S., on trouve :

	Champ moyen H en unités CGS.		
Distance b.	Observé.	Calculé.	Différence.
$0^{cm},35$	48,4	48,7	+ 0,3
0 ,85	35,6	38,3	+ 2,7
1 ,35	31,3	30,7	— 0,6
1 ,85	24,7	25,2	+ 0,5
2 ,35	22,4	20,8	— 1,6
2 ,85	18,7	17,7	— 1,0
3 ,85	12,9	12,9	0,0
5 ,35	8,34	8,66	+ 0,32
10 ,35	3,37	3,24	— 0,13
15 ,35	1,77	1,59	— 0,18

E. Bouty.



OBSERVATIONS

SUR LA

DÉPERDITION DE L'ÉLECTRICITÉ (*)

Dans un travail publié assez récemment (**), M. P. de Heen, directeur de l'Institut de physique de l'Université de Liège, décrit des expériences faites par lui sur la déperdition de l'électricité dans l'air par un corps électrisé de diverses manières.

En comparant entre elles les électrisations produites par une machine de Holtz et par une machine Ramsden, l'auteur du travail arrive aux conclusions suivantes :

« L'électricité positive de la machine de Holtz se perd plus rapidement que l'électricité positive de la machine de Ramsden. — Ces électricités ne sont donc pas identiques. »

M. de Heen a été amené à faire des expériences qu'il décrit en partant de l'hypothèse que : « l'électricité statique est le résultat de vibrations de l'éther condensé qui recouvre la surface des corps. »

(*) *Bulletin de la Société Vaudoise des sciences naturelles*, 4e s., vol. XXXIV, n° 127, mars 1898.

(**) Note sur l'infinie variété de l'énergie électrique, *Bulletin de l'Institut de physique de l'Université de Liège*, 1897, 4e fascicule, et *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, 3e série, t. XXXII, n° 12, p. 712-716, 1896.

Les conclusions de l'auteur sont déduites des résultats de soixante observations faites sur le temps qu'emploie un corps électrisé à se décharger partiellement, c'est-à-dire à passer d'un potentiel de valeur déterminée à un autre potentiel d'une autre valeur inférieure.

La différence de potentiel inconnue était mesurée au moyen d'un électroscope de Henley, posé sur un plateau de bois isolé et partiellement recouvert d'étain. Les expériences ont consisté à noter le temps écoulé entre le passage de la boule de sureau de l'électroscope d'une position angulaire déterminée à une autre position..

La moyenne des observations publiées donne les résultats suivants :

1°	Électricité	positive	de la machine	de	Ramsden,	60,5 sec.
2°	—	—	—		Holtz,	42,8 —
3°	—	négative	—		Holtz,	19,9 —

Les chiffres de la première série sont compris entre 91 et 49 secondes; ceux de la deuxième entre 47 et 33 secondes et ceux de la troisième entre 24 et 15 secondes.

La conclusion que M. de Heen tire de ces expériences est de telle importance, au point de vue de nos connaissances sur la nature de l'électricité, que nous nous sommes empressés de répéter ces expériences en les variant; ce sont les résultats de ces mesures que nous donnons ici.

Pour commencer par un cas simple, nous avons mesuré la déperdition d'une sphère de zinc de 30 centimètres de diamètre (utilisée pour les expériences de Hertz), supportée par un flacon à isolement d'acide

sulfurique de M. Mascart. La sphère était en communication permanente avec un électromètre de Braun mesurant jusqu'à 1.600 volts. On notait le temps nécessaire pour une chute de potentiel de 1.500 à 950 volts.

La sphère était électrisée positivement au moyen d'un bâton de verre poli frotté avec de la soie imprégnée d'amalgame de mercure et d'étain, et négativement par un bâton d'ébonite frotté avec une peau de chat. La machine de Holtz était une machine à un plateau mobile et un plateau fixe et à trois peignes, pour empêcher le renversement des pôles.

Les premières observations ont été faites par MM. Cruchet et Mathey, étudiants; elles ont donné les résultats suivants :

Chute de potentiel . . . . 1.500 à 950 volts.

Durée de chute :

1.	Électricité	négative.	ébonite,	14	minutes.
2.	—	positive.	verre,	14	—
3.	—	—	Holtz,	15	—
4.	—	négative.	Holtz,	14	—

Le lendemain, on a trouvé pour les mêmes chutes de potentiel : expérience 1 : 12 et 13 minutes; expérience 2 : 10 et 9 minutes; expérience 3 : 9 minutes; expérience 4 : 10 minutes.

En examinant le détail des séries ou expériences, on constate également qu'il n'y a que des différences irrégulières et faibles entre la déperdition de la sphère de zinc dans les divers cas.

C'est ainsi qu'on trouve qu'en 8 minutes la chute de potentiel est de :

1.	1.500 à 1.090 v.	pour l'électricité	négative	de l'ébonite;
2.	1.500 à 990 v.	—	positive	du verre;
3.	1.500 à 1.010 v.	—	négative	de Holtz;
4.	1.500 à 990 v.	—	positive	de Holtz.

Il serait difficile, d'après ces chiffres, de conclure à une différence de déperdition pour l'un ou l'autre des états électriques.

On est peut-être étonné de ne pas reconnaitre la différence, si souvent constatée, entre la déperdition par le zinc de l'électricité positive et négative; ce fait provient de ce que la sphère employée n'avait pas été frottée depuis plusieurs mois, elle était donc recouverte de la patine d'oxyde que ce métal acquiert par un long séjour à l'air; dans ces conditions, l'action de la lumière est insensible, comme nous l'avons précédemment démontré (*).

Ainsi, avec une sphère métallique isolée, et entre les limites de tension employées, il n'y a pas de différence sensible dans la déperdition de l'électricité produite par diverses sources.

Mais l'expérience de M. de Heen a été faite dans d'autres conditions; il a employé une *planchette* couverte partiellement d'étain et « convenablement isolée ».

Pour répéter l'expérience de l'auteur, nous avons employé une planchette circulaire de 15 centimètres de diamètre sur 1 centimètre d'épaisseur, à bords arrondis; cette planchette était couverte de papier d'étain depuis dix ans, elle était parfaitement sèche, on l'a fixée sur un isoloir Mascart et reliée à l'électro-

(*) Déperdition de l'électricité sous l'action de la lumière, *Archives des sciences phys. et nat.*, t. XXXIV, 1895, p. 294.

mètre de Braun. Pour éviter toute action perturbatrice de l'air électrisé ou du voisinage d'une machine, l'appareil était dans un grand auditoire inoccupé, et la machine de Holtz, placée dans une autre salle, n'était mise en communication avec la planchette que par le moyen d'un fil de cuivre fin isolé passant par un trou d'une porte. Aussitôt que l'électromètre et la planchette étaient chargés, le fil était enlevé.

Les expériences faites dans ces conditions ont donné les résultats suivants :

1° Électricité négative (ébonite frottée), de chute de potentiel, 1.500 à 950 volts en 10 minutes. On touche le bouton de l'électroscope, qui reste relié à la planchette, il revient à zéro; puis l'aiguille remonte lentement, en 2 ou 3 minutes, à 350 volts; le signe électrique est négatif;

2° Mêmes résultats avec l'électricité positive de verre frotté.

Après décharge complète, on emploie la machine de Holtz, on obtient :

3° Machine de Holtz négative, chute de potentiel de 1.500 à 950 volts en 4 minutes, baisse très rapide au début : 450 volts en *deux* minutes, tandis que précédemment elle était de 180 à 190 volts pendant le même temps. Après contact et retour au zéro, le potentiel remonte à 225 volts en 2 minutes, électricité négative ;

4° Machine de Holtz positive. Chute de potentiel, de 1.500 à 950 volts en 5 minutes, baisse de 370 volts pendant les deux premières minutes, électricité résiduelle positive, l'électromètre monte à 220 volts en 2 minutes.

Après ces expériences, on refait des mesures de

déperdition de l'électricité positive et négative produite par le verre frotté et par l'ébonite frottée, les résultats sont les suivants :

5° Électricité positive (verre frotté), chute de potentiel, de 1.500 à 950 volts en 10 minutes.

On électrise immédiatement le disque négativement sans le mettre pendant un temps prolongé en communication avec le sol, et on observe :

6° Électricité négative (ébonite), chute de potentiel de 1.500 à 950 volts en 6 m. 30 secondes.

On électrise une seconde fois le disque *négativement* avec l'ébonite sans le décharger entièrement, et on observe :

7° Électricité négative (ébonite), chute de potentiel, de 1.500 à 950 volts en 10 minutes.

On électrise positivement, sans décharger à fond, et on observe :

8° Électricité positive (verre), chute de potentiel de 1.500 à 950 volts en 4 minutes.

On voit que chaque alternance de signe électrique est accompagnée, en employant le disque de bois, d'une déperdition apparente beaucoup plus rapide, quel que soit du reste le procédé d'électrisation.

Des résultats tout semblables se constatent en employant une machine de Holtz. Voici, par exemple, les résultats d'expériences successives faites par un temps très sec, vent du Nord modéré, le local n'ayant servi à aucune expérience d'électricité depuis plusieurs jours :

Expériences :

1. Holtz *positive*,	chute de potentiel,	1.500 à 950 v. en 9 m. 45 s.
2. Holtz positive,	—	1.500 à 910 v. en 9 m.
3. Holtz positive,	—	1.500 à 900 v. en 9 m. 30 s.

4. Holtz *négative*, chute de potentiel, 1.500 à 950 v. en 4 m. 50 s.
5. Holtz négative, — 1.500 à 950 v. en 5 m.
6. » — 1.500 à 950 v. en 7 m. 35 s.

En opposition avec ces expériences, qui montrent l'effet d'une électrisation *antérieure* sur la déperdition actuelle du bois, voici les résultats d'expériences faites en prenant toutes les précautions possibles pour ramener à l'état neutre (potentiel du sol) tous les appareils et l'air de la chambre :

Expérience 1.	Holtz négative,	1.500 à 800	volts	en 12 min.
— 2.	Holtz positive,	1.500 à 780	—	—
— 3.	Ébonite négative,	1.500 à 750	—	—
— 4.	Verre positif,	1.500 à 710	—	—

On voit que, dans ces conditions, la différence entre la déperdition de l'électricité positive ou négative produite par une machine de Holtz, par du verre frotté ou par de l'ébonite frottée est insensible, et il serait prématuré d'en tirer la conclusion qu'il y a une différence de nature entre l'électricité produite par l'un ou par l'autre des procédés employés pour électriser les corps.

L'explication des différences constatées nous paraît devoir être cherchée dans les phénomènes de pénétration de l'électricité dans un corps médiocre conducteur tel que le bois. Grâce à cette pénétration, la déperdition apparente qu'indique l'électromètre est la somme des effets dus à la déperdition vraie, dans l'air, et à la pénétration dans le diélectrique.

Mais ce dernier phénomène complique les mesures ultérieures et il est évident que l'électrisation négative, par exemple, de l'étain sur du bois encore chargé dans la profondeur d'électricité positive est

accompagné d'une neutralisation beaucoup plus rapide de la charge négative que celle qui se produirait sur un corps non électrisé.

Ces phénomènes de superposition d'états électriques différents sont connus dès longtemps et ils nous paraissent suffisants pour expliquer les différences observées sans faire intervenir une qualité nouvelle et spéciale dépendant de l'origine de l'électricité employée.

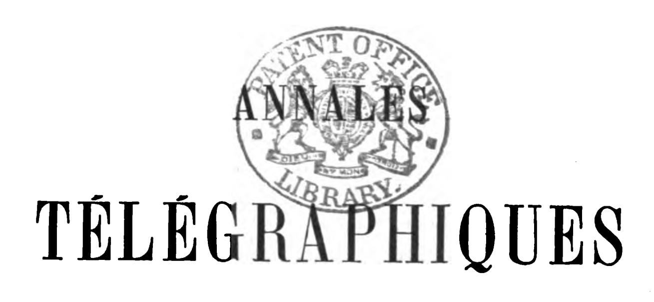
Ces faits ne préjugent pas de la question soulevée par M. de Heen, nous avons voulu seulement montrer que les expériences indiquées ne peuvent suffire pour la résoudre.

Laboratoire de physique, mars 1898.

Henri DUFOUR,
Professeur de physique à l'Université de Lausanne.

L'Éditeur-Gérant : Vve CH. DUNOD.

8 727. — Imprimerie LAHURE, 9, rue de Fleurus, à Paris.


ANNALES

TÉLÉGRAPHIQUES

Année 1898. 4-4-99 Septembre-Octobre

NOUVEAUX

CABLES DE LA COMPAGNIE FRANÇAISE

DES CABLES TÉLÉGRAPHIQUES

CABLE NEW-YORK-CAP HAÏTIEN. CABLE BREST-CAP COD

Depuis les premiers jours de septembre 1898 la France communique directement avec les États-Unis par une ligne télégraphique sous-marine. Ce nouveau câble transatlantique relie Brest au cap Cod et double l'ancien câble français (Pouyer-Quertier) qui unissait également Brest au cap Cod, mais par l'intermédiaire de la colonie française de Saint-Pierre.

Le nouveau câble présente cette particularité intéressante qu'il est le plus long qui fonctionne actuellement à la surface du globe.

Il complète le réseau déjà fort important que possède et exploite en Amérique la Compagnie française



des câbles télégraphiques : reliant New-York au cap Haïtien, dans la république d'Haïti, et rayonnant de là sur Saint-Thomas, les Antilles françaises, Cuba, les Guyanes, le Vénézuela et le Brésil. Actuellement, le cap Cod est relié à New-York par une ligne télégraphique aérienne, sur le territoire des États-Unis, mais, prochainement, un câble côtier de 200 milles environ sera posé par la Compagnie entre ces deux stations, et le réseau des câbles français se trouvera dès lors ininterrompu entre Brest et les points d'atterrissement de l'Amérique du Sud.

La Compagnie française des câbles télégraphiques est liée à l'État français par la convention du 2 juillet 1895, dont le texte a été publié par les *Annales télégraphiques* (*). Cette convention obligeait la Compagnie à faire construire et à poser le câble de New-York à Haïti, dit câble de jonction et le câble de Brest au cap Cod avec communication directe entre le cap Cod et New-York. Aujourd'hui que ces deux grands câbles, les premiers de dimensions aussi considérables qui aient été construits en France, sont achevés et en exploitation, il nous a paru intéressant de donner ici quelques renseignements sur leur fabrication et leur pose.

Nous nous occuperons d'abord du câble de jonction qui a été posé le premier et qui fonctionne déjà depuis près de deux ans.

Câble de jonction New-York-Haïti. — Ce câble a été construit par la Société industrielle des téléphones dans ses usines de Bezons et de Calais. Il présente

(*) *Annales télégraphiques*, tome XXIII (janvier-février 1897), pages 62 et suivantes.

une longueur totale de 1479 milles. La fabrication dans les deux usines a été suivie et contrôlée par des agents de l'État.

Ames. — L'âme du câble a été construite à l'usine de Bezons. Commencée au mois d'avril 1896, elle était terminée dans les premiers jours de juillet.

Elle est formée d'un toron de cuivre du poids de 100 kilogrammes par mille marin recouvert de trois couches concentriques de gutta-percha, dont le poids total est de 80 kilogrammes par mille.

Le toron comprend un fil de cuivre central de $1^{mm},76$ de diamètre entouré de 12 fils de $0^{mm},61$. Le cuivre employé était de haute conductibilité (de 22 à 22,25 ohms légaux à 24 degrés centigrades pour un fil de 1 millimètre de diamètre et 1 kilomètre de longueur.

Les essais électriques des âmes ont été effectués à Bezons, après trente-six heures au moins d'immersion dans l'eau à 24 degrés et après une électrisation préalable à 1000 volts.

La résistance électrique du cuivre était, en moyenne, de $5^{\omega},3$ par mille à 24 degrés, la capacité de $0^{\varphi},39$ par mille, l'isolement sous 550 volts à la deuxième minute a été fort variable. Compris généralement entre 700 et 1200 Ω par mille à 24 degrés, il a atteint exceptionnellement 543 Ω et 1313 Ω.

Câblage. — Les âmes expédiées à l'usine de Calais ont été, après un second essai électrique, recouvertes de leurs filins et de leur armature. Cette opération, commencée en mai 1896, a été terminée le 22 août de la même année.

Voici la spécification des divers types de câbles qui sont entrés dans la constitution de la ligne de New-York à Haïti :

TYPE DES CABLES	ARMATURE				FILINS			
	Nombre de fils	Diamètre du fil	RÉSISTANCE de rupture		TANNÉS SUR L'AME		GOUDRONNÉS sur l'armature	
			du fil par millim. carré	du câble	1re couche	2e couche	1re couche	2e couche
		millim.	kilog.	tonnes				
Haute mer A	17	2,45	120	9,305	13 fils à 500m de fil au kilog.	18 fils à 800m de fil au kilog.	28 fil à 800m de fil au kilog.	32 fil à 800m de fil au kilog.
Haute mer B	17	2,45	145	11,245				
Intermédiaire	11	4.50	40	6,875	8 f. à 250	16 f. à 500	32 f. à 800	36 f. à 800
Côtier. 1re armature	Câble haute mer, type A.							
Côtier. 2e armature	12	7,50	40	24,08	»	»	40 f. à 800	44 f. à 800
Intermédiaire sous ruban de cuivre	L'armature est la même que pour le type ordinaire, mais l'âme est recouverte d'un ruban de toile blanche de 29mm de large, d'un ruban de cuivre de 17mm et d'un ruban goudronné de 25mm.				16 f. à 500	2 f. à 1.000	32 f. à 800	36 f. à 800
Côtier sous ruban de cuivre					18 f. à 700	2 f. à 1.000	40 f. à 800	44 f. à 800

Les longueurs fabriquées ont été, pour chaque type, les suivantes :

Haute mer A, 914 milles. — Ce câble, armé avec du fil d'acier résistant à 120 kilogrammes par millimètre carré, a été immergé dans les profondeurs moyennes (inférieures à 5 000 mètres).

Haute mer B, 390 milles. — Ce type, armé de fil d'acier très résistant (145 kilogrammes par millimètre carré) a été posé dans les très grandes profondeurs (de 5 000 à 6 000 mètres) qui avoisinent l'île de Haïti.

Intermédiaire, 83,7 milles. Côtier, 87,3 milles. — Atterrissements du côté de New-York.

Intermédiaire sous ruban de cuivre, 1,1 mille.

Côtier sous ruban de cuivre, 3 milles. — Ces deux câbles sous ruban de cuivre ont servi aux atterrissements du côté de Haïti où les câbles sont particulièrement exposés aux attaques des animaux marins.

Pose. — La pose du câble a été effectuée par deux navires, le *François-Arago*, appartenant à la Société industrielle des Téléphones et la *Seine*, appartenant à la « Telegraph Construction and Maintenance C° » de Londres.

Les fonctionnaires de l'État ont contrôlé l'embarquement des câbles à bord des deux navires, mais n'ont pas été chargés de suivre les opérations de pose, ni d'assister aux essais après la pose. Ces opérations ont été difficiles et, commencées dans le courant du mois d'août 1896, elles n'ont été terminées qu'à la fin du mois de décembre 1896.

Les points d'atterrissement du câble sont l'île Coney, près de New-York et le cap Haïtien, à Haïti. Le tracé du câble traverse, au nord d'Haïti, la région où se trouvent les plus grandes profondeurs de l'Atlantique.

Ce câble est en exploitation depuis le commencement de l'année 1897.

Câble transatlantique Brest-cap Cod. — Le câble transatlantique a également été construit à Bezons et à Calais par la Société industrielle des téléphones. Sa longueur totale est de 3174 milles. La fabrication et la pose de ce câble ont été contrôlées par des fonctionnaires de l'administration.

Ames. — L'âme est formée d'un toron de cuivre du poids de 300 kilogrammes par mille marin. Le fil cen-

tral, d'un diamètre de $3^{mm},04$ est entouré de douze fils de $1^{mm},09$ de diamètre.

La résistance électrique du cuivre employé était la même que celle du cuivre ayant servi à la confection du câble de jonction.

Le toron de cuivre est recouvert de trois couches concentriques de gutta-percha dont le poids total est de 180 kilogrammes par mille marin.

Le diamètre extérieur de l'âme est d'environ $12^{mm},3$ et l'épaisseur moyenne de la triple couche de gutta d'environ $3^{mm},55$.

Les essais électriques des âmes ont été effectués à Bezons dans les conditions suivantes :

Un premier essai était fait en première couche dans l'eau à la température ambiante. Il permettait d'éliminer toutes les âmes dont la première couche présentait un défaut. L'âme terminée était immergée dans l'eau à 24 degrés et son isolement et son électrification étaient étudiés avec le plus grand soin, après 55 heures au moins d'immersion ; cette étude comportait :

1° Un essai d'isolement pendant 2 minutes avec une pile de 200 éléments Leclanché ;

2° Une électrisation d'une heure avec le pôle négatif d'une pile de 700 à 1 000 éléments Leclanché ;

3° La répétition de l'essai n° 1 ;

4° Une étude de l'électrification de l'âme à l'aide des deux pôles de la pile de 200 éléments, le courant négatif et le courant positif étant l'un et l'autre maintenus pendant 10 minutes.

La comparaison des résultats de ces divers essais permettait d'apprécier la valeur électrique de chaque section d'âme.

La fabrication des âmes commencée le 11 août 1896

a été terminée le 24 juillet 1897. La longueur totale expédiée à Calais a été de 6 483 kilomètres d'âme. Une longueur supplémentaire de 620 kilomètres a été fabriquée pendant l'hiver et le printemps de 1898 pour parer aux remplacements de câbles nécessités par les accidents de la pose et constituer une réserve.

La résistance électrique du conducteur a varié de $1^{\omega},75$ à $1^{\omega},85$ par mille marin à 24 degrés centigrades. La capacité électrostatique a été comprise entre $0^{\varphi},41$ et $0^{\varphi},50$ par mille. L'isolement par mille à 24 degrés (à la deuxième minute et avec le pôle négatif d'une pile de 200 éléments Leclanché) a varié de 500 à 1 400 mégohms.

D'après les conditions du cahier des charges imposé par la Compagnie française des câbles télégraphiques à la Société industrielle des téléphones, la résistance du cuivre à 24 degrés devait rester inférieure à $1^{\omega},85$, la capacité inférieure à $0^{\varphi},50$ et la résistance d'isolement à 24 degrés devait être comprise entre 250 Ω et 1500 Ω.

Câblage. — Voici la spécification des divers types de câbles qui sont entrés dans la constitution de la ligne de Brest au cap Cod :

TYPE DES CABLES	ARMATURE				FILINS			
	Nombre de fils	Diamètre du fil	RÉSISTANCE de rupture		TANNÉS SUR L'AME		GOUDRONNÉS sur l'armature	
			du fil par millim. carré	du câble	1re couche	2e couche	1re couche	2e couche
		millim.	kilog.	tonnes				
Haute mer, type A	24	2,29	120	11,45	14 fils à 500m de fil au kilog.	21 fils à 700m de fil au kilog.	32 fils à 800m de fil au kilog.	38 fils à 800m du fil au kilog.
Haute mer, type B	24	2,29	150	13,31				
Intermédiaire	15	4,50	40	9,37	13 f. à 250	20 f. à 500	34 f. à 800	38 f. à 800
Atterrissage, 1re armature	24	2,29	40	25,35	14 f. à 500	21 f. à 700	22 f. à 500	24 f. à 500
Atterrissage, 2e armature	15	6,80	40				44 f. à 800	48 f. à 800
Côtier, 1re armature	24	2,29	40	31,91	14 f. à 500	21 f. à 700	22 f. à 500	24 f. à 500
Côtier, 2e armature	24 (10 torons de 3 fils)	5,60	40				48 f. à 800	52 f. à 800

Le tableau suivant donne les diamètres extérieurs et les poids par mille dans l'air et dans l'eau de mer de ces divers câbles :

	Diamètre total.	Poids dans l'air.	Poids dans l'eau de mer.
Haute mer, type A	26mm	2.785kg par mille.	1.670kg par mille.
Haute mer, type B	26	2.785 —	1.670 —
Intermédiaire	33	5.030 —	3.500 —
Côtier	46	11.600 —	7.760 —
Atterrissage	54	15.100 —	10.000 —

Le câblage, commencé à Calais le 19 octobre 1896, a été terminé le 20 août 1897. Une longueur de 300 milles environ a été fabriquée en supplément pendant le courant de l'année 1898.

Les longueurs totales fabriquées en 1896, 1897 et 1898 ont été les suivantes :

Câble de haute mer, type A	3.095 milles
Câble de haute mer, type B	285 —
Câble intermédiaire.............	302 —
Câble côtier.................	13 —
Câble d'atterrissage............	19 —
Total...........	3.714 milles

Pose. — En raison de sa grande longueur et de son poids considérable, le câble Brest-New-York a dû être posé en plusieurs fois. Trois navires ont concouru à son immersion : le *François-Arago*, de la Société industrielle des téléphones, le *Dacia* et le *Silvertown*, de la compagnie anglaise de Silvertown (India rubber gutta-percha and telegraph Works C°).

Les atterrissements ont été posés du côté de Brest par le *François-Arago* dans les premiers jours d'avril 1897. Du côté du cap Cod l'opération semblable a été effectuée en juin de la même année par le *Dacia.* La pose du câble de grands fonds contrariée par une série d'accidents n'a pu être terminée dans le courant de 1897 et ce n'est que le 2 septembre 1898 que l'épissure finale a été enfin immergée par le *François-Arago.* L'ensemble de l'opération avait nécessité douze campagnes successives dont plusieurs ont été rendues pénibles et périlleuses par la persistance de très mauvais temps.

Le câble fonctionne depuis le 7 septembre 1898. Il relie les abords de Brest au cap Cod. Sa longueur est de 3 174 milles.

La résistance électrique totale du conducteur est d'environ 5 269 ohms à la température du fond de la mer, la capacité électrostatique voisine de 1 500 microfarads. La vitesse de transmission déterminée à l'aide d'un siphon recorder de Muirhead muni d'un

vibrateur a été trouvée supérieure à 390 signaux élémentaires par minute. Pour la détermination du nombre de signaux transmis par minute, on a compté les intervalles entre les lettres pour un signal et les intervalles entre les mots pour deux signaux.

Ainsi qu'on l'a fait remarquer plus haut, le nouveau câble transatlantique français est le câble le plus long qui existe actuellement. Par les dimensions de son âme (300 kilogrammes de cuivre et 180 de gutta par mille marin) il se classe parmi les plus volumineux; on peut donc dire que la réussite de cette entreprise, qui a nécessité un effort considérable, réalise pour l'industrie française un remarquable succès.

Au point de vue des communications internationales, l'existence d'un câble direct à grand débit entre la France et les États-Unis d'Amérique présente aussi une grande importance.

F.-G. de Nerville.

HOTEL DES TÉLÉPHONES

DE LA

RUE GUTENBERG A PARIS (*)

Le développement du service téléphonique à Paris a rendu promptement insuffisants non seulement le multiple pour six mille abonnés qui avait été monté au poste principal, il y a cinq ans environ, mais encore l'équipement partiel du multiple pour neuf mille abonnés que l'Administration française avait commandé en 1895 pour le même poste. On a dû terminer l'équipement ; l'achèvement de cette importante installation donnera sans doute quelque actualité à la description de ce poste.

L'Hôtel construit spécialement pour le service téléphonique est élevé en façade sur l'ancienne rue Gutenberg, entre les rues du Louvre et Jean-Jacques Rousseau et comprend, en dehors d'un rez-de-chaussée et d'une vaste salle placée sous les combles, trois étages principaux recevant largement la lumière par des baies vitrées, qu'on a développées sur 40 mètres de longueur. La hauteur sous plafond des trois étages principaux est de 5 mètres en nombre rond. La longueur du bâtiment, y compris les grosses rotondes qui le terminent aux deux extrémités, dépasse 63 mètres. Deux ailes moins importantes disposées en retrait, l'une touchant à la rue du Louvre, l'autre en-

(*) Extrait du *Journal télégraphique international de Berne*, juin-octobre 1898.

bordure sur la rue Jean-Jacques Rousseau, com-

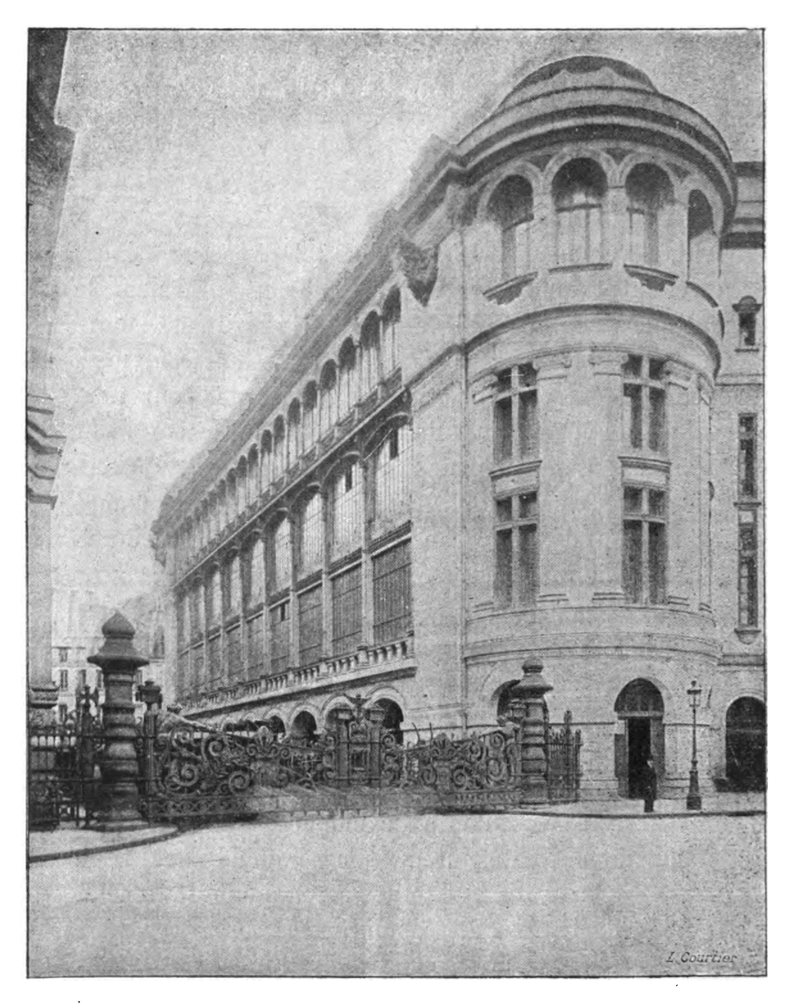


Fig. 1.

plètent l'ensemble et fournissent l'espace nécessaire aux cages d'escalier très spacieuses, aux salles acces-

soires consacrées aux services d'ordre, etc. Le rez-de-chaussée, ouvert, sert provisoirement d'abri pour les omnibus appartenant à l'Hôtel des Postes, situé en face de l'Hôtel des Téléphones.

SOUS-SOL ET RÉPARTITEUR D'ENTRÉE

On connaît le développement du système des égouts à Paris et l'on comprend dès lors que l'Administration française ait été conduite à l'utiliser pour installer ses conducteurs télégraphiques ou téléphoniques. Les lignes arrivent, par des égouts spéciaux formant branchements sur le réseau général, dans un sous-sol bétonné régnant sous tout l'édifice. Le réseau téléphonique de Paris a, dès l'origine, été constitué à l'aide de lignes bifilaires; c'en a été, avec l'emploi en dérivation des annonciateurs de fin de conversation, une des caractéristiques ; c'est dire que les conducteurs aboutissent au Poste central cordés deux à deux : isolés à l'aide de papier et d'air sec, ils sont groupés par câbles de 56 et 112 paires. Il eût été difficile, à moins de majorer dans une mesure appréciable les frais de construction, de laisser le sous-sol et les étages d'une seule portée, sans supports intermédiaires, dans la largeur de 10 mètres entre parois : le sous-sol a dû en conséquence être partagé longitudinalement en deux parties, comme on le voit au plan, par un gros mur d'ailleurs percé de nombreuses baies. La moitié nord-est livre passage aux câbles provenant des branchements nos 1 et 2 vers le « répartiteur d'entrée » : celui-ci, probablement le plus étendu qui existe aujourd'hui, occupe dans la moitié sud-ouest une longueur de 38 mètres sur une largeur de 0,75 m.

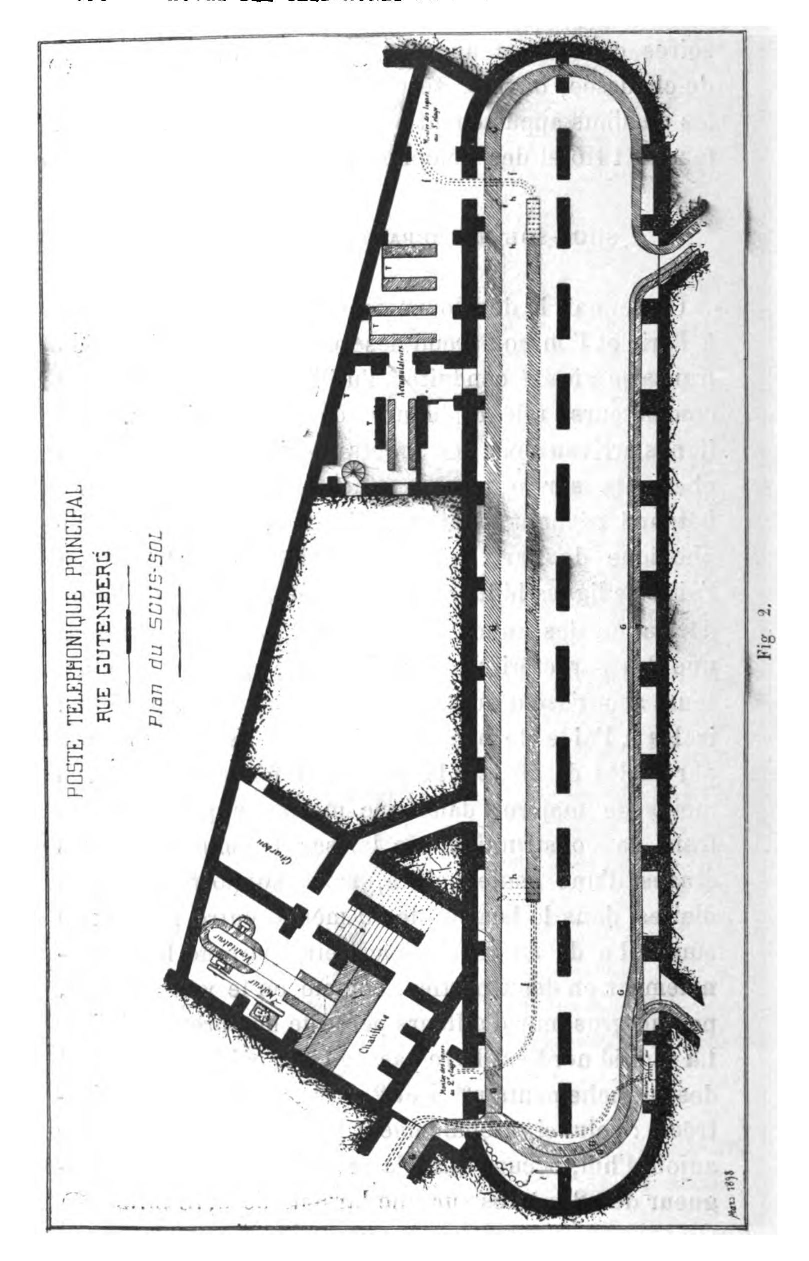

POSTE TELEPHONIQUE PRINCIPAL
RUE GUTENBERG
Plan du SOUS-SOL
Accumulateurs
Charbon
Chaufferie
Ventilateur
Moteur

Fig. 2.

Légende de la figure 2.

GG gaines en tôles contenant les câbles urbains;
gg — — interurbains;
hh arrivée des câbles urbains au répartiteur;
FF câbles de raccord avec les multiples;
TT ensemble des panneaux de distribution des accumulateurs;
A réservoir à air comprimé;
t panneau pour la distribution de l'air comprimé.

Répartiteur d'entrée. — Le principe général du commutateur multiple est connu(*) : on se rappelle que la ligne de chaque abonné N′ est représentée, à la portée de chaque opérateur, par des organes terminaux ou *jacks* sur lesquels ledit opérateur peut prendre la communication demandée par un autre abonné quelconque N à destination de cet abonné N′.

Le système combiné pour éliminer, dans les stations importantes, la subordination entre opérateurs inhérente aux systèmes primitifs et les répétitions d'avis ou manœuvres avec les ralentissements qui en découlent, combiné en un mot pour conserver, comme dans les moindres bureaux, la mise directe en communication à l'aide d'un seul employé, n'a de raison d'être et ne peut garder sa pleine efficacité que si le nombre de jacks généraux mis à la disposition de chaque opérateur est considérable : ceux-ci devant être par conséquent petits et très ramassés, il est impossible d'y annexer sur une étiquette, si réduite qu'on la suppose, le nom de l'abonné et de classer ces jacks autrement que par ordre numérique. Indépendamment de toute autre considération, cette condition entraînerait à elle seule l'obligation de désigner par un numéro les jacks généraux, c'est-à-dire les

(*) Voir l'Étude sur la téléphonie, par le regretté Dr Rothen (*Journal télégraphique international de Berne*, vol. XI, 1887, p. 131).

abonnés demandés à la ligne desquels ils sont spécialement affectés. Utile dans les petits bureaux, l'*appel au numéro* est indispensable dans les bureaux importants. Mais pour qu'il reste pratique, pour que les demandes portent sur le numéro et non pas sur le nom de l'abonné demandé, encore faut-il que ce numéro soit immuable autant que possible. Il faut que chaque abonné garde la même ligne de multiple, la même série de jacks généraux, vînt-il, quant à lui, à changer de domicile dans le district desservi par le commutateur. Il faut donc que les exploitants maintiennent cette constance tout en se réservant la possibilité de transférer l'abonné d'une ligne *extérieure* sur une autre ligne *extérieure*. De là deux parties bien distinctes dans les lignes d'abonnés. De là la nécessité d'établir un système quelconque de permutation entre les lignes de *multiple* et les lignes *extérieures*. Il est facile d'imaginer un système de ce genre : mais en combiner un qui, sans entraîner de perpétuelles confusions, s'applique lorsqu'il s'agit de 8, de 10 ou de 20000 fils est chose assez délicate, ceux qui ont été un peu mêlés à l'exploitation d'un bureau télégraphique important le savent. En téléphonie, où le nombre des fils est beaucoup plus considérable qu'en télégraphie, ce problème a été examiné d'une façon très particulière et l'on a installé à l'entrée des postes des meubles, petits ou grands, simples ou compliqués, mais ayant pour destination commune de permettre une répartition invariable des jacks généraux sur le multiple, d'où le nom de « répartiteur d'entrée » qu'ils ont reçu. C'est un meuble de ce genre qui occupe la moitié sud-ouest du sous-sol. Peut-être l'agencement en eût-il été légèrement différent si, au début, on en avait prévu

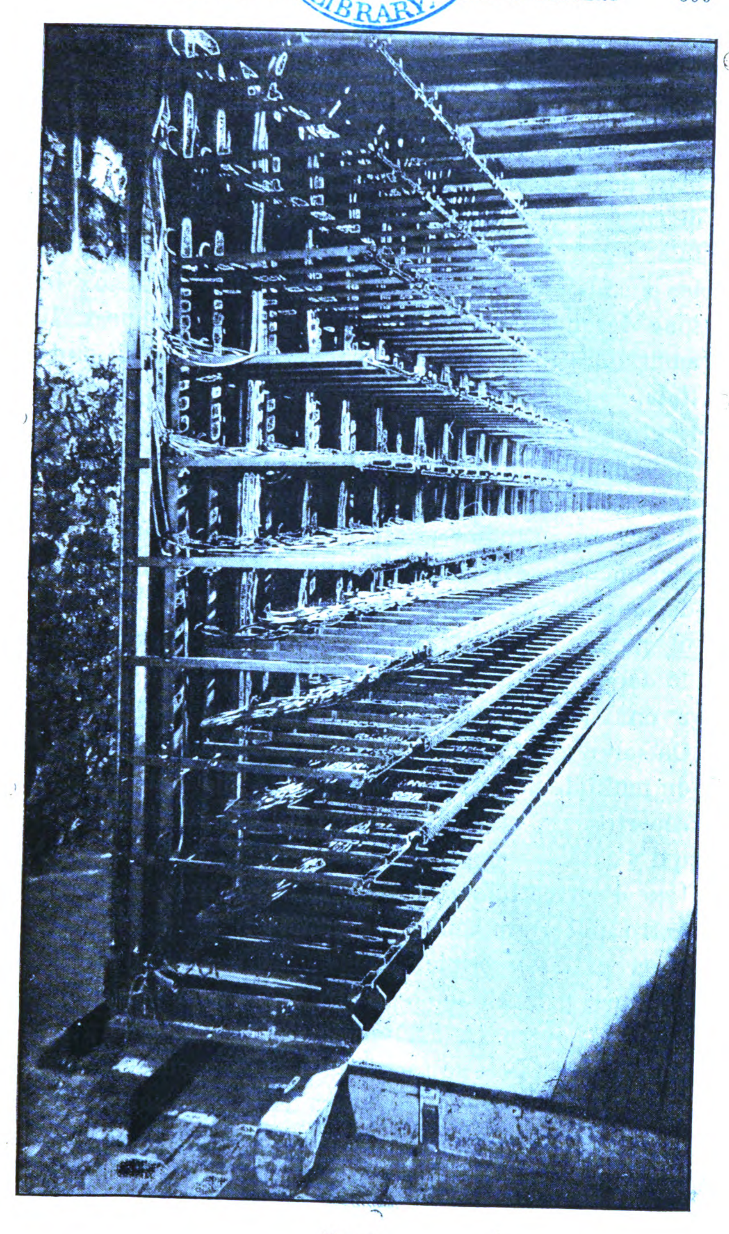


Fig. 3.

l'extension ultérieure: tel qu'il est néanmoins, le type est certainement un des meilleurs que nous connaissions et se rapproche d'ailleurs beaucoup de celui qu'a indiqué ici même le Dr Wietlisbach (*). Imaginons, dans deux plans verticaux parallèles, deux systèmes de supports, les uns formés par des traverses horizontales sur lesquelles aboutissent les lignes de multiple, les autres constitués par des montants verticaux le long desquels se terminent les lignes extérieures. Il suffit alors en principe, pour relier un abonné au multiple, de tendre des fils auxiliaires entre sa ligne extérieure et sa ligne de multiple. Mais ces liaisons perpétuellement modifiées entraînent une confusion et un désordre complets dans l'ensemble des fils auxiliaires si l'on n'y introduit une certaine classification. Cette classification est facilement obtenue : on convient de décomposer en deux parties le parcours de chaque fil auxiliaire, en le maintenant successivement : 1° dans le plan vertical du montant d'où il part; 2° dans le plan horizontal de la traverse où il aboutit. On sait ainsi nettement, la ligne extérieure et la ligne du multiple de chaque abonné étant par ailleurs bien répertoriées, quel est le parcours des fils auxiliaires qui y correspondent. Réciproquement, sur le répartiteur d'entrée lui-même, les fils auxiliaires, distribués entre un certain nombre de nappes horizontales étendues et de multiples nappes verticales d'ailleurs étroites, peuvent toujours être facilement suivis d'un bout à l'autre. A l'Hôtel de la rue Gutenberg, les câbles extérieurs se terminent sur les montants verticaux par des têtes de câbles ; les câbles sont, avant

(*) *Journal télégraphique international de Berne*, vol. XVIII, 1894, p. 209.

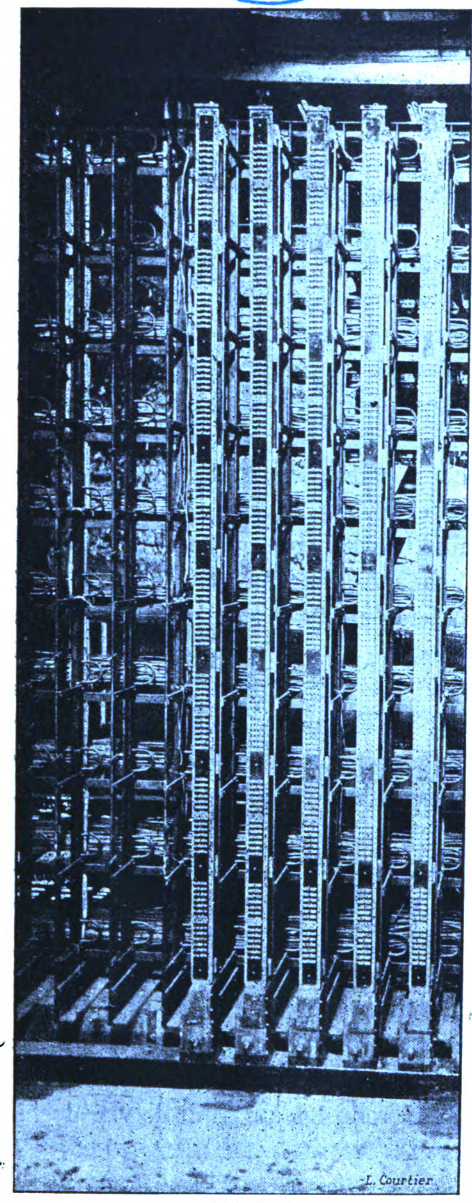


Fig. 4.

d'arriver au répartiteur, munis, sous le faux plancher amovible qui les recouvre, des tubulures nécessaires à l'application du procédé de M. Barbarat pour restaurer par le lavage à l'air sec l'isolement des câbles tout posés, sans les retirer des égouts ou des conduites (*). Quant aux traverses horizontales, ce sont simplement de longues bandes d'ébonite où l'on a fixé de petites plaques de laiton munies de deux vis; sous les vis sont serrés d'une part le fil allant au multiple, d'autre part le fil auxiliaire. Nous préférons quant à nous un système d'attache analogue à celui représenté fig. 5, où sont ménagées de petites lames, aux extrémités étamées, sur lesquelles on soude les fils; si, dans le cours d'une année, le nombre des permutations est relativement considérable pour l'ensemble des fils auxiliaires, les permutations, sur chaque ligne prise isolément, forment le cas exceptionnel et nous ne voyons pas de raison pour combiner le matériel en vue de ce cas exceptionnel alors qu'une soudure, dès qu'elle a été bien faite, donne toutes les garanties de bon contact durable pour le régime normal de la ligne. En cas de dérangement, il est, à vrai dire, nécessaire que la ligne puisse être soumise à des essais électriques soit vers l'extérieur, soit du côté du multiple: c'est à la tête de câble, point naturel de la séparation, qu'on a toujours soin de ménager la possibilité de la coupure.

L'installation du répartiteur d'entrée dans le sous-sol, que les circonstances rendaient à peu près inévitable, ne va pas évidemment sans d'assez sérieux inconvénients; on se trouve dans des conditions d'autant plus défavorables au point de vue de l'isolement

(*) *Annales télégraphiques*, 1894, t. XXI, p. 193.

que les égouts y arrivent directement; mais, par la fermeture de ceux-ci à l'aide de portes et par un chauffage convenable du local, on parvient à empêcher pratiquement les pertes qui tendent à se produire

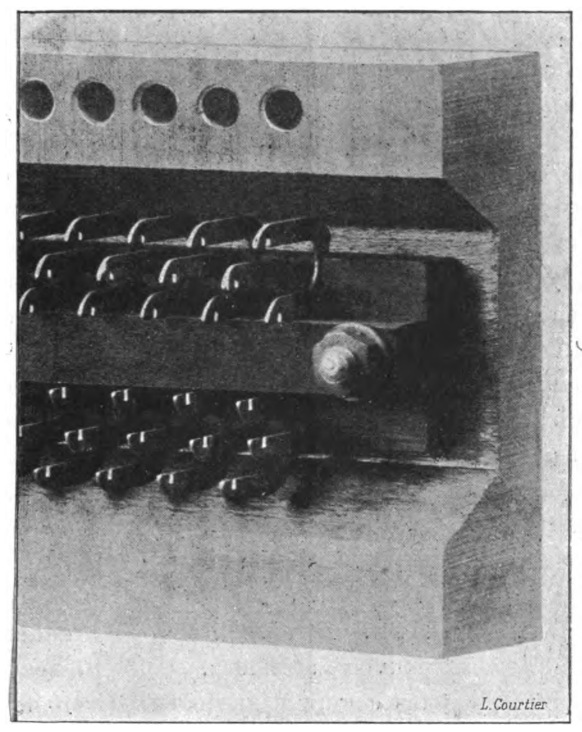


Fig. 5.

aux points d'attache et dans les petits câbles sous coton paraffiné constituant les liaisons.

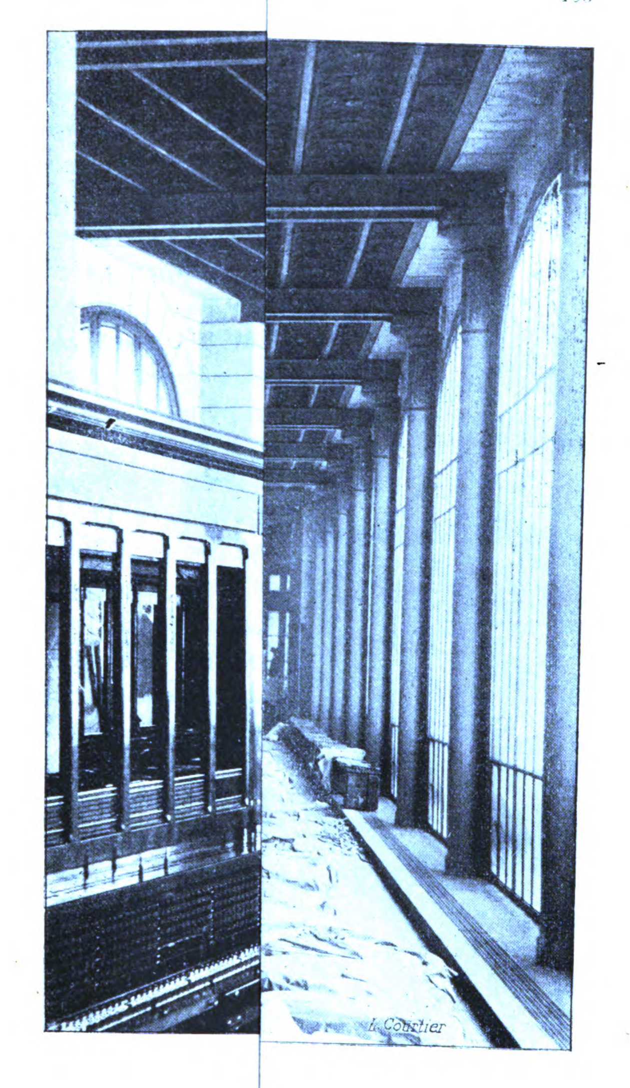
ÉQUIPEMENT DU DEUXIÈME ÉTAGE. — MULTIPLE SÉRIE.

Du sous-sol, des câbles sous coton paraffiné et des câbles sous plomb à 21 paires avec isolement au pa-

pier, montant par de larges puits, prolongent directement les circuits d'abonnés jusqu'au deuxième et au troisième étage où sont montés respectivement le premier commutateur multiple et le second; le premier étage est réservé au service interurbain et au service suburbain. Les lignes de Paris étant, comme nous l'avons rappelé, à circuits métalliques, l'un et l'autre multiple sont bifilaires; l'un et l'autre également appartiennent à la catégorie des dicordes, les commutateurs monocordes n'ayant pas paru répondre aux exigences du réseau de Paris. L'ancien multiple commandé par l'Administration française en 1891 est d'un des systèmes dits « en série » parce que l'un des deux fils de chaque ligne se poursuit d'un bout à l'autre du meuble *à travers* les contacts successifs *en série* qui existent à chaque section entre la lame ressort et le butoir du jack correspondant. Les communications en sont bien connues aujourd'hui (*). Le meuble dont la fig. 6 représente une des faces en cours de montage, renferme 26 sections ordinaires d'abonnés. Il comporte en outre 4 tiers de section ou tierces sections, destinées à compléter, à portée des opérateurs travaillant aux extrémités, la série entière des jacks généraux qu'ils doivent pouvoir atteindre, puis 10 sections d'arrivée pour les communications en provenance du reste du réseau et enfin 2 sections et 2 tierces sections d'entrée ou de rupture où aboutissent tout d'abord les câbles venant du sous-sol.

Sections de rupture. — L'Hôtel en effet n'a pas été simplement aménagé pour le service intérieur du

(*) *Journal télégraphique international de Berne*, vol. XI, 1887, p. 132.


L. Courtier

réseau de Paris ; c'est là qu'est également établi le service téléphonique interurbain et international ; or, comme les lignes téléphoniques n'ont en somme qu'un faible rendement, comme les longues lignes sont coûteuses et, partant, peu nombreuses, comme il importe dès lors d'y éviter toute perte de temps, c'est-à-dire d'y rendre les communications aussi aisées et aussi sûres que possible, il est indispensable de débarrasser les circuits dont elles deviennent parties intégrantes de tout ce qui n'est pas strictement nécessaire à ces communications. En d'autres termes, il serait parfaitement inutile, et par là même nuisible, ayant à relier à une ligne interurbaine une ligne d'abonné, de laisser celle-ci en relation avec tout le câblage du multiple et les divers organes qui s'y raccordent. Par conséquent, du moment qu'un multiple présente quelque importance, avant d'y amener les lignes on les fait passer dans des jacks spéciaux, dénommés « jacks à rupture », où l'enfoncement d'une fiche reliée par son cordon avec les postes de téléphonie interurbaine détermine la disconnection, la rupture automatique, de la liaison entre la ligne et le multiple. Ces jacks à rupture sont groupés par sections comme ceux du multiple et le nombre des sections (une ou deux, nous n'avons pas connaissance qu'on ait été jusqu'à trois) dépend à la fois du nombre d'abonnés et du nombre d'opérateurs qu'on veut affecter à leur service interurbain. Ce sont ces sections qui ont reçu le nom de sections de rupture.

Sections d'arrivée. — Des sections de rupture, les lignes d'abonnés parviennent aux sections de « départ » et aux sections « d'arrivée » formant le multiple pro-

prement dit. Le réseau de Paris, en outre de l'Hôtel de la rue Gutenberg, renferme sept autres postes centraux reliés à l'Hôtel par un certain nombre de lignes d'intercommunication divisées 1° en lignes d'arrivée, par où sont renvoyés à la rue Gutenberg les circuits d'abonnés sur lesquels ont été demandées en ces postes des communications à destination des abonnés de l'Hôtel et 2° en lignes de départ servant à transférer vers ces postes les communications en provenance de l'Hôtel. Les premières sont distribuées entre les sections d'arrivée seules : un opérateur de ces sections recevant l'ordre d'un poste secondaire n'a qu'à relier la ligne d'intercommunication choisie, dans les mêmes conditions qu'une ligne de demandeur aboutissant aux sections ordinaires de départ, avec le jack général qui, situé à sa portée, représente la ligne de l'abonné demandé. Dès que la demande *est parvenue* au multiple, elle reçoit donc satisfaction aussi rapidement que si elle émanait d'un abonné directement relié au bureau.

En fait, les lignes se poursuivent tout le long du multiple et traversent, sur une longueur de 75 mètres, 36 sections entières de l'un et l'autre genre repliées (*fig.* 7) en deux longues lignes parallèles tournées dos à dos avec passage entre les deux. Chaque section, comportant 240 annonciateurs d'abonnés, est montée pour être desservie, et aux heures chargées est desservie, par 3 téléphonistes.

ÉQUIPEMENT DU TROISIÈME ÉTAGE. — MULTIPLE DÉRIVATION.

Au troisième étage vient d'être achevé l'équipement du multiple auquel nous faisions allusion en com-

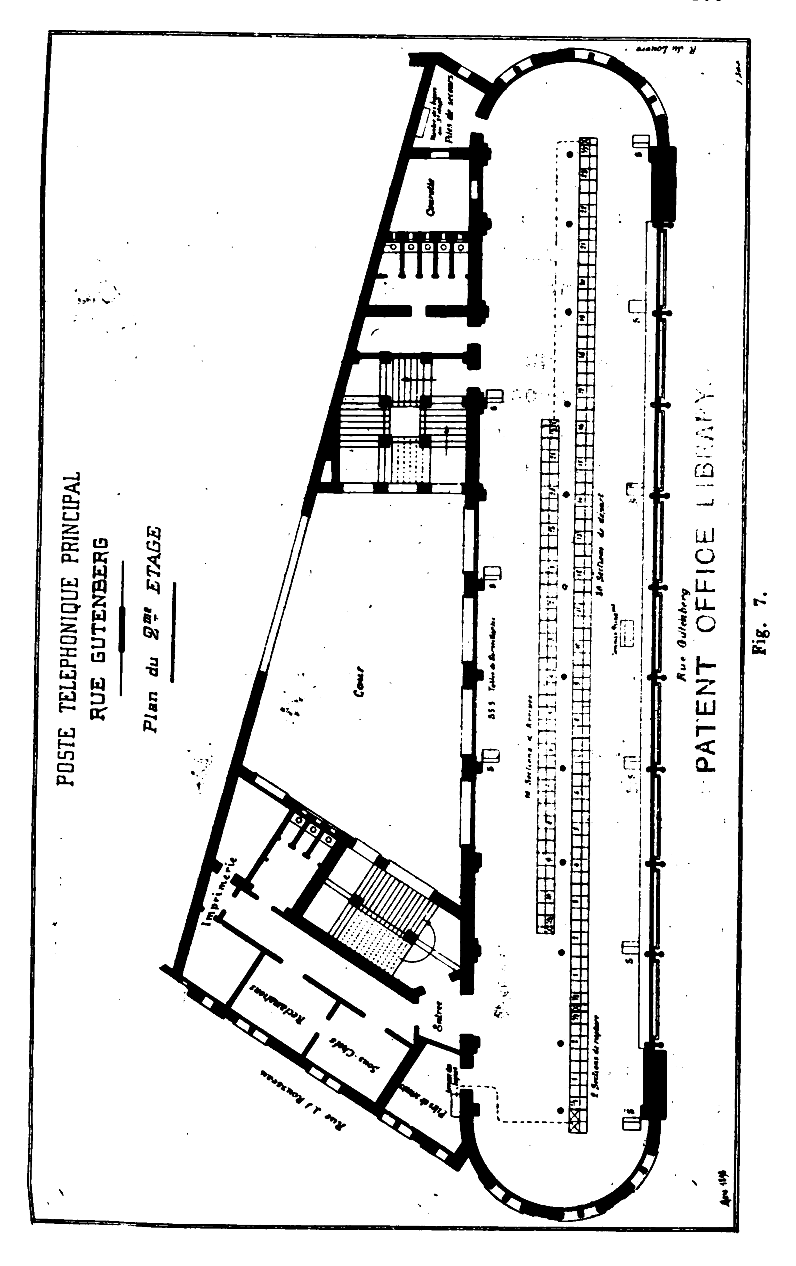

POSTE TELEPHONIQUE PRINCIPAL
RUE GUTENBERG
Plan du 2me ETAGE
Cour
Imprimerie
Réclamations
Sous-Chefs
Entrée
Rue J.J. Rousseau
Rue Gutenberg
R. du Louvre

Fig. 7.

mençant. Bien qu'il ne soit basé sur aucun principe absolument nouveau, il renferme à peu près tous les organes perfectionnés éprouvés, à l'époque (1895) où en fut commandée la première partie, par une pratique suffisamment étendue ; l'un d'entre eux même, le jack, y a été appliqué en grand pour la première fois ; l'installation comme l'emploi d'un pareil commutateur, le plus important, croyons-nous, de ceux édifiés jusqu'ici, constitue en somme l'une des plus grosses expériences téléphoniques qui aient été faites. D'une capacité de 9300 abonnés, équipé maintenant pour 9000, le multiple du 3e étage, en dehors de 2 sections et 2 tierces sections de rupture, comprend 30 sections de départ à 3 places et 300 annonciateurs individuels, 15 sections d'arrivée et 4 tierces sections correspondantes. Ce commutateur construit comme les appareils précédents par la Société de Matériel téléphonique, associée française de la Western Électric C^{o} est d'un système dit « en dérivation » rappelant celui précédemment expérimenté à la fin de 1892 pour 1500 abonnés environ à Albany (État de New-York) et sur le modèle duquel avait été établi le multiple de Zurich décrit ici même par le Dr Wietlisbach. Il n'y a point, on le sait, à s'effrayer outre mesure des dérangements auxquels expose, dans un multiple en série, l'existence des contacts successifs entre les ressorts et les butoirs ; la statistique qu'a publiée jadis M. Sargent sur le bureau principal de Brooklyn (*), l'exemple plus rapproché de nous du bureau de Bâle, montrent que c'est là affaire de soins et de simples mesures de propreté. Comme cette dernière qualité n'est pas toujours appréciée à sa juste valeur et comme du reste le risque du dérange-

(*) *Electrical Rewiew*, 21 septembre 1889.

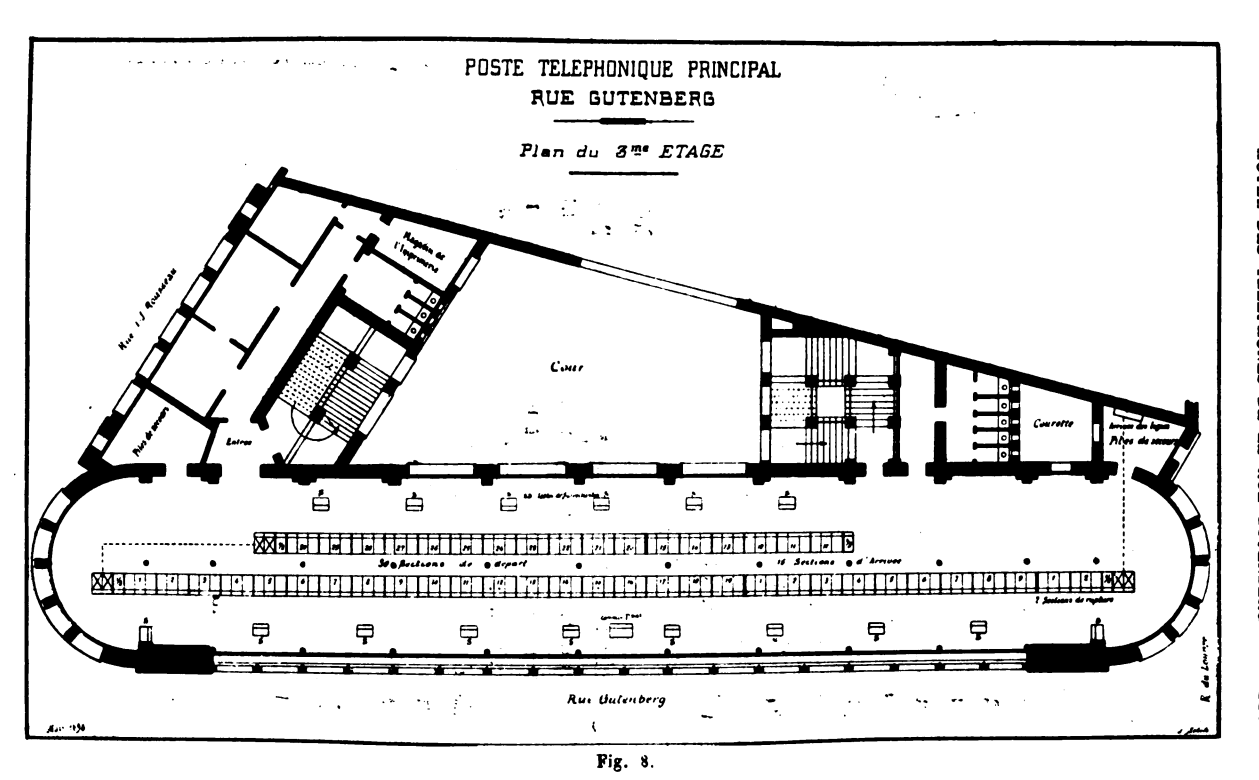

POSTE TELEPHONIQUE PRINCIPAL
RUE GUTENBERG
Plan du 3me ETAGE
Cour
Courette
Entrée
30 Sections de départ
16 Sections d'Arrivée
Rue Gutenberg

Fig. 8.

ment subsiste lors même que le dérangement ne se produit pas, il est meilleur de supprimer ce souci, d'éliminer ce risque.

On a déjà, dans le multiple-série, un des deux fils des lignes bifilaires relié *en dérivation*, le long du meuble, à l'anneau de chaque jack général ; il est naturel de faire un pas de plus et de traiter d'une manière analogue le second fil. C'est ce qui est obtenu dans le multiple dont nous nous occupons.

Chaque jack général ou individuel (*fig.* 9 et 15) comporte 2 ressorts, a_1, c_1,... a_m, c_m,... a_i, c_i, respectivement reliés en dérivation aux deux fils de ligne L_1 et L_2, un ressort p_1,... p_m,... p_i, en communication avec le pôle d'une pile p dont l'autre pôle est à la terre, et un anneau ou bague ρ_i,.... ρ_m,... ρ_i, qui apparaît à l'extérieur du meuble et représente, pour l'opérateur, l'entrée du jack où il doit introduire la fiche ; tous les anneaux ou bagues appartenant aux jacks d'une même ligne sont électriquement reliés. On peut noter incidemment un avantage du montage en dérivation : le jack individuel peut être raccordé aux fils de ligne en un point quelconque de la longueur du commutateur multiple ; c'est une supériorité appréciable sur le multiple-série ; tout le retour de la ligne depuis l'extrémité du multiple jusqu'à la section où se trouve placé le jack individuel est ainsi évité. Entre les ressorts a_i et c_i du jack individuel est monté l'annonciateur individuel ou, pour être plus exact, le circuit de ligne de l'annonciateur individuel ; celui-ci est muni d'un second circuit, exclusivement local, dont nous nous occuperons tout à l'heure. Ceci acquis, on voit que, si l'insertion d'une fiche dans un jack quelconque a_m, c_m, p_m, ρ_m, a pour effet, non seulement de

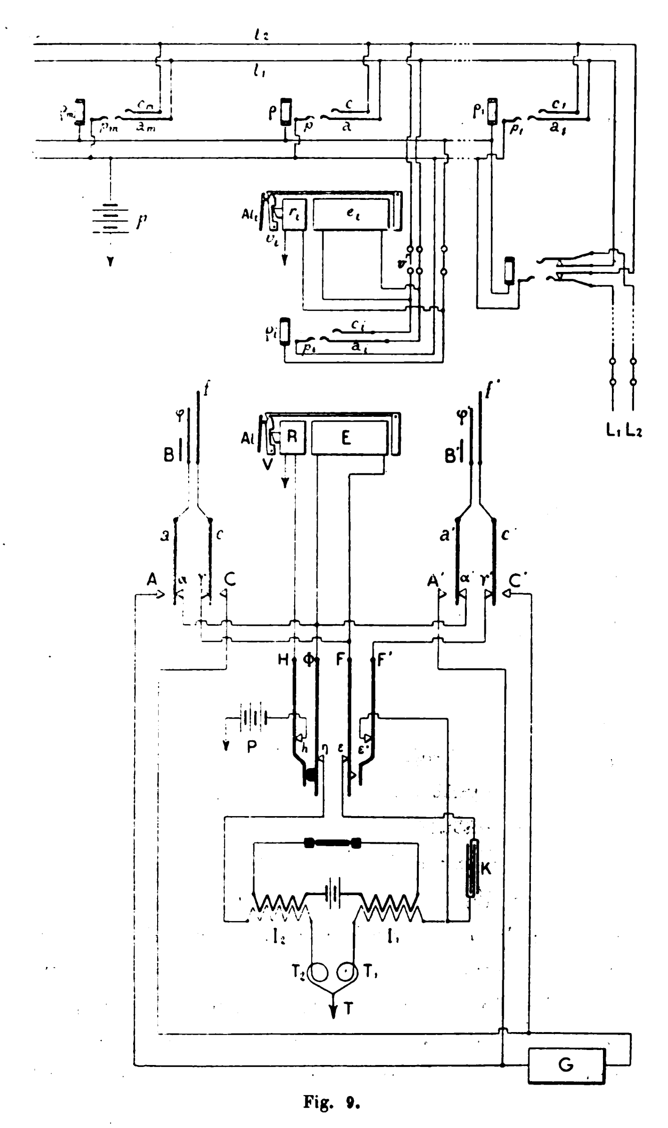


Fig. 9.

mettre les deux fils de ligne en communication respectivement avec chacun des conducteurs du cordon bifi-

laire qu'elle termine, mais encore de réunir métalliquement le ressort p_m et l'anneau ρ_m, la pile p sera mise elle-même en communication avec l'ensemble des anneaux ρ_1...... ρ_m...... ρ_i. Ceci fournit le moyen : 1° de provoquer automatiquement ou du moins sans manœuvre spéciale, le retour et le maintien au repos du volet d'annonciateur v_i que l'abonné demandeur a actionné en demandant le bureau; 2° de faire, dans une section quelconque du multiple, l'essai de la ligne pour savoir si elle est occupée. Voici comment.

L'annonciateur (représenté schématiquement *fig.* 9 et plus loin, *fig.* 10 et 11 aux deux tiers) est double, comprenant l'annonciateur proprement dit e_i et un électro-aimant r_i servant au rappel du volet v_i après fonctionnement. C'est l'enroulement de e_i qui aboutit aux ressorts a_i et c_i du jack individuel. Quant à l'enroulement de r_i, il est, par une extrémité, mis à la terre et, par l'autre, relié à l'ensemble des anneaux ρ_1,.... ρ_m,.... ρ_i. Le volet en fer doux v_i forme une véritable armature pour r_i et ne s'écarte jamais que d'une petite quantité de cet électro-aimant. Lorsqu'un abonné appelle, le courant venant de son poste arrive dans e_i et, par le jeu de l'armature de e_i, détermine le fonctionnement du volet v_i. L'insertion d'une fiche dans le jack individuel a pour effet, comme on s'en rendra compte lorsqu'on examinera la construction des fiches, de mettre en communication métallique le ressort p_m et l'anneau ρ_m, c'est-à-dire de relier l'électro-aimant de rappel r_i au pôle libre de la pile p : un courant passe dans r_i, provoque l'attraction du volet v_i par cet électro-aimant et le volet revient prendre la position d'attente.

Pour nous rendre compte de l'essai, il nous suffira maintenant de jeter un coup d'œil sur la partie infé-

rieure de la *fig.* 9 représentant des liaisons électriques entre les fiches $f\ \varphi$, $f'\ \varphi'$ et l'ensemble des clefs d'appel $a\ \alpha\ \gamma\ c$, $a'\ \alpha'\ \gamma'\ c'$, de la clef d'écoute $F'\ \varepsilon'\ F\ \varepsilon\ \eta\ \Phi$, du circuit secondaire $I_1\ I_2$ de la bobine d'induction du poste microtéléphonique d'opérateur et du téléphone $T_1\ T_2$. Chaque paire de fiches comprend une fiche $f\ \varphi$ qu'on peut appeler « fiche de réponse », permettant de provoquer et de recevoir les instructions du demandeur et une fiche $f'\ \varphi'$ ou « fiche d'appel » destinée à prendre communication avec la ligne du demandé sur le jack général de celle-ci et, en particulier, à l'appeler. Chacune de ces fiches, lorsqu'on l'enfonce dans un jack, déterminant, comme nous venons de le dire, un *mélange* entre l'ensemble des anneaux ρ et les ressorts p appartenant aux jacks d'une même ligne, il en résulte que, sur toute ligne « occupée », un anneau quelconque se trouvera en communication avec la pile p. Supposons alors qu'avec un conducteur aboutissant à un téléphone relié par ailleurs à la terre, l'on vienne toucher l'un de ces anneaux, l'une de ces bagues, un courant venant de p le traversera, déterminera un bruit sec, le téléphone fera entendre un *toc*. Rien de semblable ne se produira si la ligne à laquelle appartient le jack touché est « libre », l'anneau étant alors isolé. Tel est le principe de l'*essai*. La fiche de réponse ayant été placée dans le jack individuel de l'appelant, l'ordre de celui-ci ayant été reçu, l'opérateur, avec la pointe f' de la fiche d'appel, touche l'anneau du jack général qui, à sa portée, représente la ligne du demandé. Celle-ci est-elle libre? L'opérateur n'entend rien dans le téléphone, qu'il a toujours à l'oreille, de son poste de service. Il complète la communication en achevant le mouvement, déjà amorcé, d'enfoncement de la fiche,

appelant l'abonné par la manœuvre de la clef d'appel A′ a' α' γ' c' C′ et retirant par celle de la clef d'écoute son poste du circuit composite (ligne du demandeur — paire de cordons — ligne du demandé) qu'il vient de former. Si au contraire la ligne est occupée, un courant part de la pile p, arrive à l'anneau que touche la pointe f'' de la fiche, à cette pointe f', traverse le conducteur qui y est attaché, le ressort c', le contact γ', le ressort F′, le contact ε', le demi-enroulement secondaire I_1 de la bobine d'induction, le demi-enroulement T_1 du téléphone et se ferme par la terre avec laquelle est relié le milieu du téléphone, entre les demi-enroulements T_1 et T_2. Le *toc* dont nous parlions tout à l'heure est dès lors obtenu, l'opérateur éloigne la pointe f' de l'anneau du jack qu'elle touchait, et laisse la fiche f' φ' revenir, sous l'influence du poids tenseur suspendu au cordon, dans son alvéole de repos. Il donne en même temps au demandeur l'avis « occupé » puis retire aussitôt du jack individuel la fiche de réponse qui est de même rappelée dans son alvéole de repos.

Nous noterons qu'en tout ceci la raison d'être de la clef de rappel correspondant à la fiche de *réponse* est loin d'apparaître. En réalité, nous avons jadis insisté sur cette particularité dans un autre recueil (*), les abonnés, dans un réseau bien mené, n'ont aucune raison pour ne pas porter le téléphone à l'oreille dès qu'ils ont sonné le bureau. Le rappel du demandeur ne doit être que tout à fait exceptionnel ; une clef de secours tout au plus par opérateur pour l'ensemble des abonnés dont il surveille les appels et une clef régulière par fiche

(*) *Annales télégraphiques*, t. XVII, 1890, p. 411.

d'*appel* doivent suffire. Au reste, l'éducation du public se fait peu à peu sur ce point comme sur bien d'autres; réglementairement aujourd'hui, dans le réseau de Paris, l'opérateur est dispensé de ce rappel du demandeur et l'on peut espérer supprimer dans un délai assez rapproché ces clefs de rappel parasites, dispendieuses et encombrantes.

On remarque incidemment que, si la communication entre les conducteurs f F et f' F′ s'établit métalliquement pour la conversation par le contact entre le ressort F et l'extrémité recourbée de F′, elle n'est obtenue entre le poste d'opérateur, dans la portion I_1, et le conducteur de la ligne de demandeur représenté par f F qu'à travers le condensateur K : au contraire f' F′ est relié métalliquement à I_1 à travers le contact ε'. Dans ces conditions, le courant d'essai provenant de la pile p passe entièrement dans le demi-enroulement T_1 du téléphone, sans subir de dérivation vers f F et le demandeur.

Il faut également noter, au sujet de la clef d'écoute, qu'elle est reliée par γ F et α α' aux deux extrémités de l'enroulement E d'un annonciateur de fin de conversation qui se trouve ainsi, pendant la conversation, placé en dérivation entre les deux conducteurs de la ligne composite comme les annonciateurs individuels (avec cette différence que les volets de ceux-ci sont bloqués pendant la communication); les abonnés peuvent donc aisément, lorsqu'ils ont terminé, donner le signal final.

Cet annonciateur E est, comme les annonciateurs individuels, doublé d'un électro-aimant de rappel : celui-ci est mis à la terre par une extrémité et, par l'autre, raccordé à un ressort H faisant partie de la

clef d'écoute. Aussi longtemps que les abonnés causent,

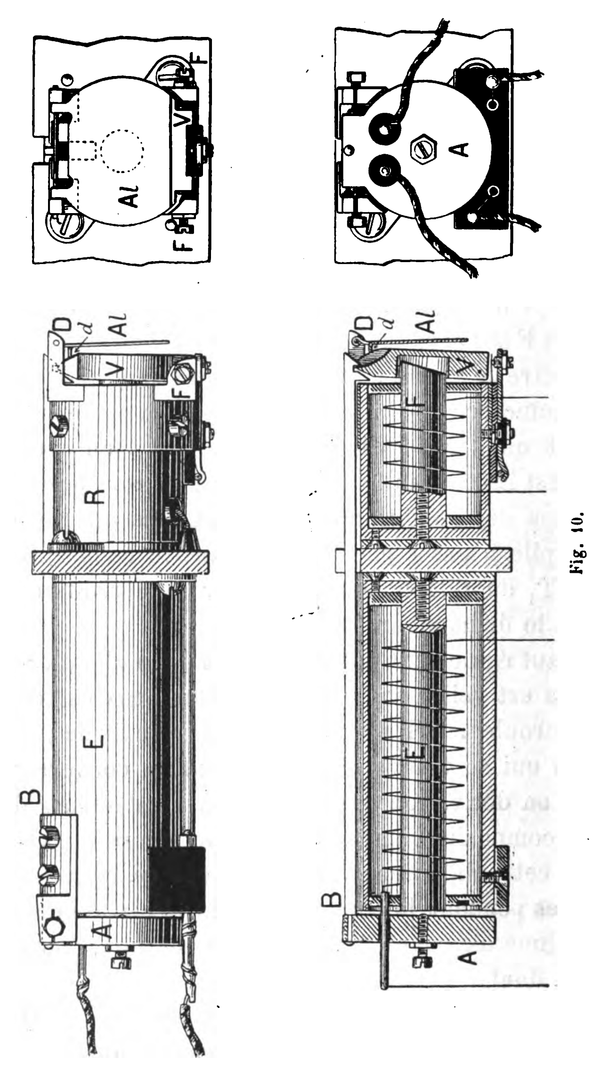


Fig. 10.

le ressort H est éloigné d'un butoir de repos *h* relié au pôle d'une pile P; celle-ci peut d'ailleurs être la même

que *p*. Quand, à la fin de la conversation, l'opérateur manœuvre la clef d'écoute pour se placer un instant en relation avec la ligne et s'assurer que la conversation est réellement terminée, les 4 ressorts F′ F, Φ et H retombent sur les butoirs *e′*, *e*, *η* et *h*, H et *h* étant en contact, le courant provenant de la pile P provoque sans manœuvre spéciale le rappel du volet V.

Dispositions matérielles. — Les principes sur lesquels repose le système que nous venons d'indiquer sont, en somme, assez simples. L'inspection des figures ci-après montrera comment il a été réalisé matériellement.

Les annonciateurs, individuels ou de fin de conversation, sont représentés fig 10 et 11. Les deux parties,

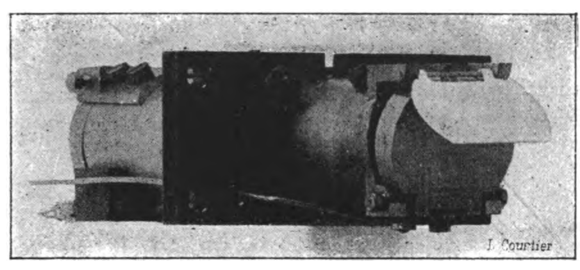


Fig. 11.

l'annonciateur proprement dit, E, et l'électro-aimant de rappel, R, sont du type dénommé « tubulaire » ou « cuirassé ». L'armature A commande le levier BC dont le bec C retient, au repos, le volet V. Celui-ci est constitué par un disque en fer doux, relativement lourd, pivotant autour de deux vis F, F et sur lequel on inscrit le numéro convenable; au repos ce disque est masqué par un léger écran d'aluminium A*l*

mobile autour de l'axe D : lorsqu'il échappe au bec C du levier, le volet, par la partie supérieure, rencontre presque immédiatement le talon *d* de l'écran A*l*; celui-ci bascule, se relève (*fig.* 11) et démasque le volet devant lequel il pendait précédemment, arrêtant en outre, par le talon *d* lui-même, le mouvement de V; en réalité, le volet ne fait que s'incliner légèrement et reste très rapproché du noyau de R : l'extrémité de ce noyau demeure engagée dans un évidement ménagé au centre du volet; le rappel de V est ainsi facilité.

La figure 12 représente une clef d'appel. Le rôle

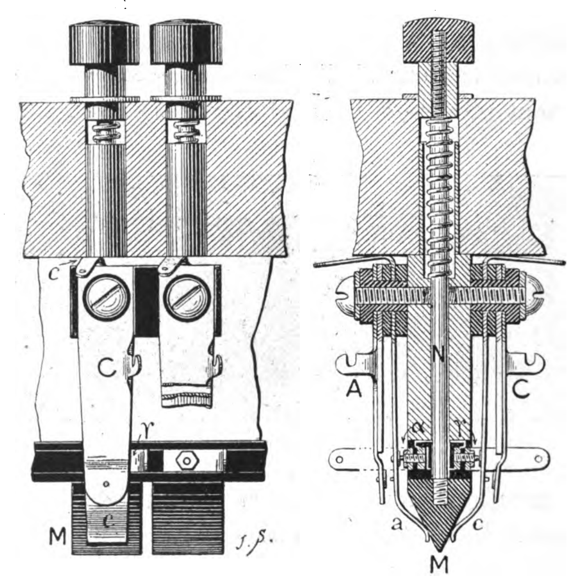


Fig. 12.

des diverses pièces a été défini plus haut. Quant à la commande des ressorts, on voit comment elle est faite : un coin d'ébonite fixé à l'extrémité inférieure de la tige N est chassé entre les ressorts *a* et *c* lors-

qu'on appuie sur le bouton poussoir en ébonite qui surmonte la tige : un ressort à boudin, entourant celle-ci, ramène le tout dans la position de repos lorsque, l'appel ayant été fait, l'opérateur abandonne le bouton poussoir. La clef d'écoute (*fig.* 13) est construite d'une

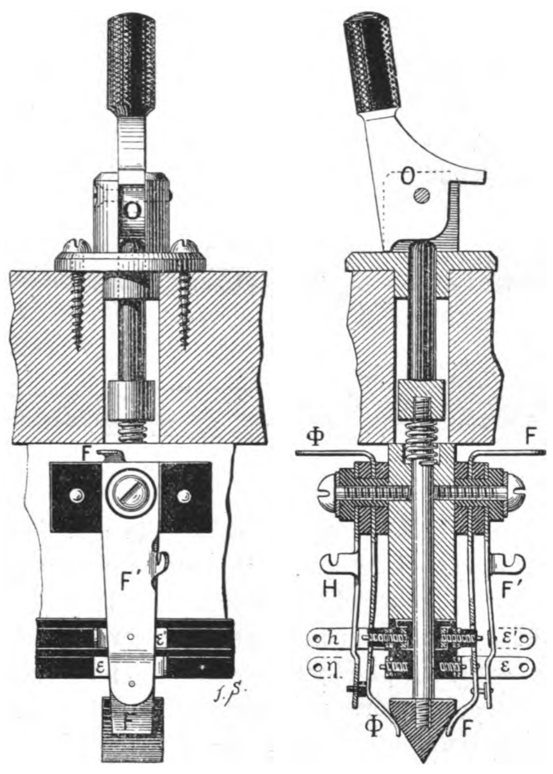


Fig. 13.

façon tout à fait analogue. La seule différence, en dehors de l'addition des ressorts dont nous avons précédemment indiqué l'existence, tient à ce que la tige et le coin sont actionnés par l'intermédiaire d'un

levier à came O, qui maintient les ressorts écartés ou les laisse reposer sur les butoirs sans que l'opérateur ait besoin d'intervenir. En effet, s'il est utile que, dans la clef d'appel, le coin et les ressorts reviennent au repos dès que le courant d'appel a été lancé sur la ligne, il est non moins utile que la clef d'écoute *reste*, indifféremment et à la volonté de l'opérateur, soit sur position d'audition, soit sur position de communication, afin que celui-ci ait les mains libres, fût-ce en écoutant, pour s'occuper d'autres opérations.

On voit par la figure 14 comment est constituée la

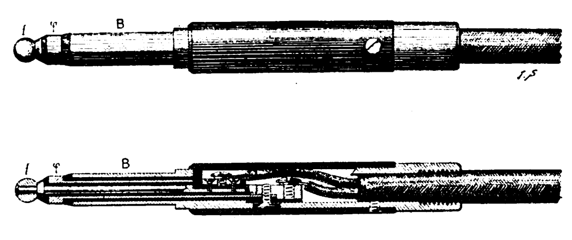


Fig. 14.

fiche ; il est aisé de se rendre compte que l'enfoncement de celle-ci dans un jack met en communication métallique la pile *p* et les anneaux de la ligne d'abonné. La fiche, en effet, outre la pointe centrale *f* et le cylindre extérieur φ auxquels aboutissent les conducteurs du cordon, comporte une bague métallique B qui, lors de l'insertion de la fiche, porte à la fois sur l'anneau ρ_m du jack et sur le ressort p_m, les mettant ainsi en court circuit.

Quant aux jacks généraux ou individuels (*fig.* 15), ils sont montés sur ébonite par réglettes de 20. Les réglettes (*fig.* 16) empilées les unes au-dessus des autres et séparées par séries, par blocs, de 5 (soit

100 jacks), à l'aide de petites lames de bois blanc ressortant bien sur le fond noir d'ébonite, forment dans chaque section 7 panneaux verticaux (voir *fig.* 17) nettement limités par les tringles en bois qui abritent la jonction des réglettes et sur lesquelles sont inscrits les numéros de centaines. Bien que les sections comportent 7 panneaux au lieu de 5 ou 6, comme habituellement, la longueur en est seulement de 1^m,79. En enlevant les tringles séparatives on démasque les jonctions (voir *fig.* 19) et l'on peut, en faisant tourner de petits écrous, retirer aisément les réglettes par l'avant du meuble, si l'on en a besoin.

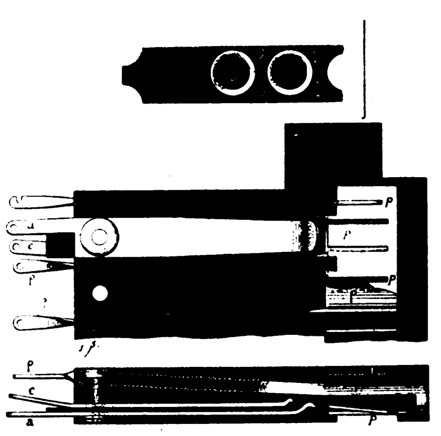


Fig. 15.

Au-dessous des jacks généraux, les panneaux renferment les réglettes de jacks individuels et celles des jacks de lignes de départ. Les annonciateurs sont rejetés vers le haut du meuble qu'ils couronnent assez heureusement (voir *fig.* 18 l'ensemble de la face sud-ouest du multiple). La disposition des annonciateurs et des jacks individuels est intéressante. Chaque section, nous l'avons dit, comprend sept panneaux; chaque section, d'autre part, est aménagée de façon à être desservie, s'il est besoin, par trois téléphonistes. En conséquence, les annonciateurs correspondant à une section ont été divisés en

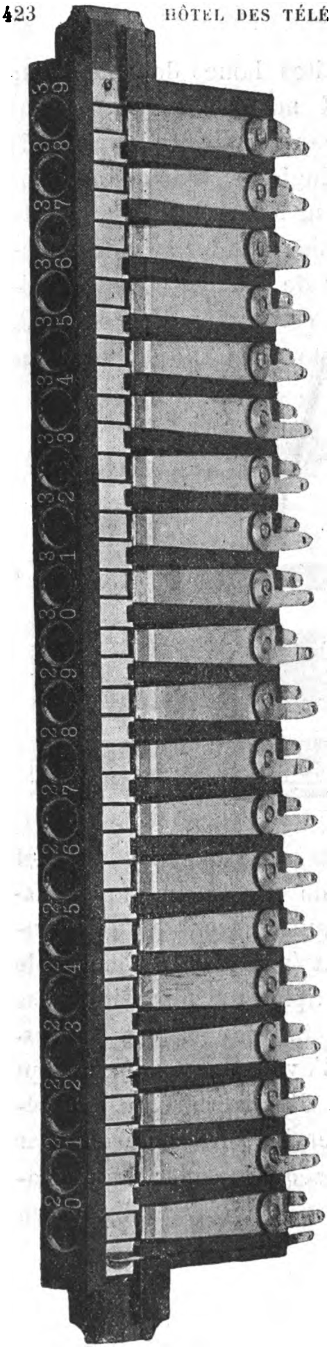


Fig. 16.

trois groupes, séparés entre eux par de grosses moulures en bois; aux deux extrémités de la section, dans le prolongement des tringles en bois qui y correspondent, des moulures semblables marquent bien pour l'œil ces extrémités et limitent bien la section (voir *fig.* 17 les places d'opérateurs n°s 76, 77 et 78). Dans chaque groupe, les annonciateurs individuels sont répartis en deux sous-divisions formées chacune de 4 lignes horizontales, dont 3 de 15 et 1 de 5 : celle-ci, placée au milieu de la quatrième ligne, détermine bien pour l'œil trois bandes verticales d'annonciateurs, celle de gauche en renfermant 15, celle du milieu 20, celle de droite 15 (voir par exemple la place 77 où les écrans d'aluminium sont tous relevés) : pour accentuer ce classement,

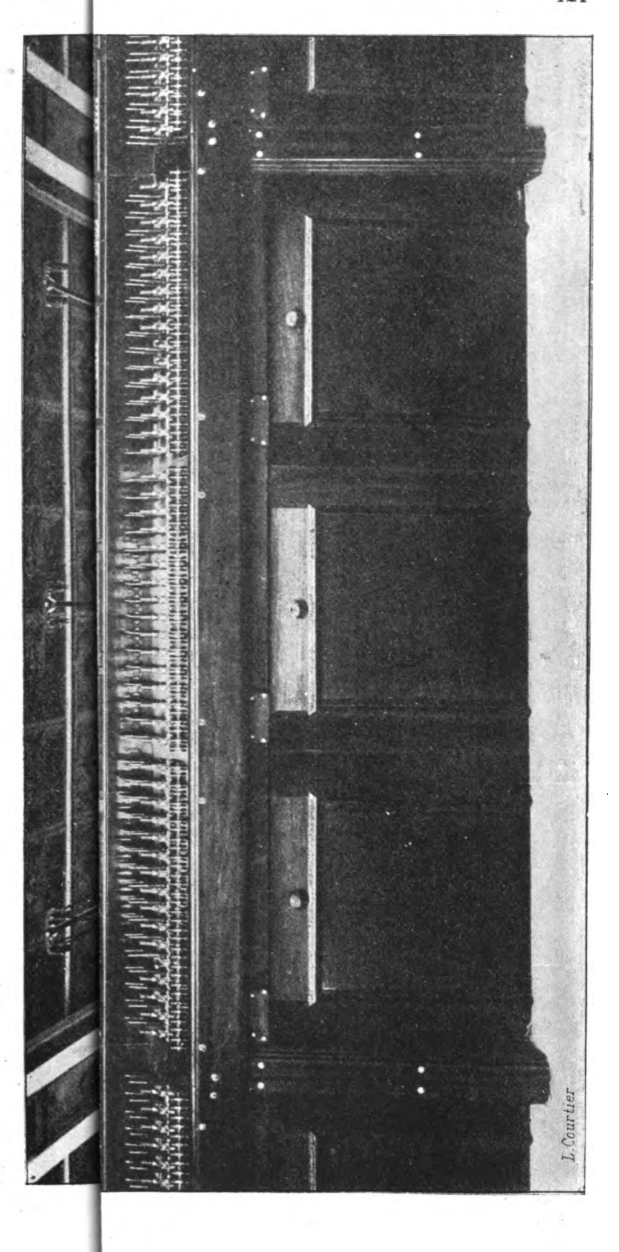


Fig. 17.

M. Séligmann-Lui, Directeur-Ingénieur, qui a combiné tout cet agencement des annonciateurs comme aussi celui des jacks individuels correspondants, a fait peindre les volets de fer, savoir : dans la sous-division supérieure, en blanc la bande de gauche, en rouge celle du milieu, et de nouveau en blanc celle de droite. Dans la sous-division inférieure, on peint la bande de gauche en rouge, celle du milieu en blanc, celle de droite en rouge. Quant aux annonciateurs de fin, au nombre de 16 dans chaque groupe, ils sont disposés sur deux lignes horizontales et les volets sont peints en bleu.

Il est nécessaire, pour la rapidité et la sûreté du service, de rendre évidente la correspondance entre les annonciateurs individuels et les jacks affectés aux mêmes lignes. Annonciateur et jack individuel forment un ensemble indivisible, qu'on peut affecter à une ligne de jacks généraux ou à une autre, mais qu'on ne peut rompre sans dommage. On a réduit au minimum et pratiquement supprimé toute hésitation de la part du personnel par l'artifice suivant. Dans chaque section, les deux premiers panneaux de gauche, à la partie inférieure, renferment les jacks individuels reliés aux annonciateurs individuels du groupe de gauche, les panneaux 4 et 5 ceux affectés au groupe central, les panneaux 6 et 7 ceux solidaires du groupe de droite. Dans le panneau 1 sont disposés, exactement dans le même ordre que les annonciateurs individuels constituant la sous-division supérieure du groupe de gauche, les jacks individuels correspondants : les 20 jacks de la bande centrale sont peints en rouge comme leurs 20 annonciateurs; les 30 jacks formant les deux bandes latérales sont peints en blanc. Dans le pan-

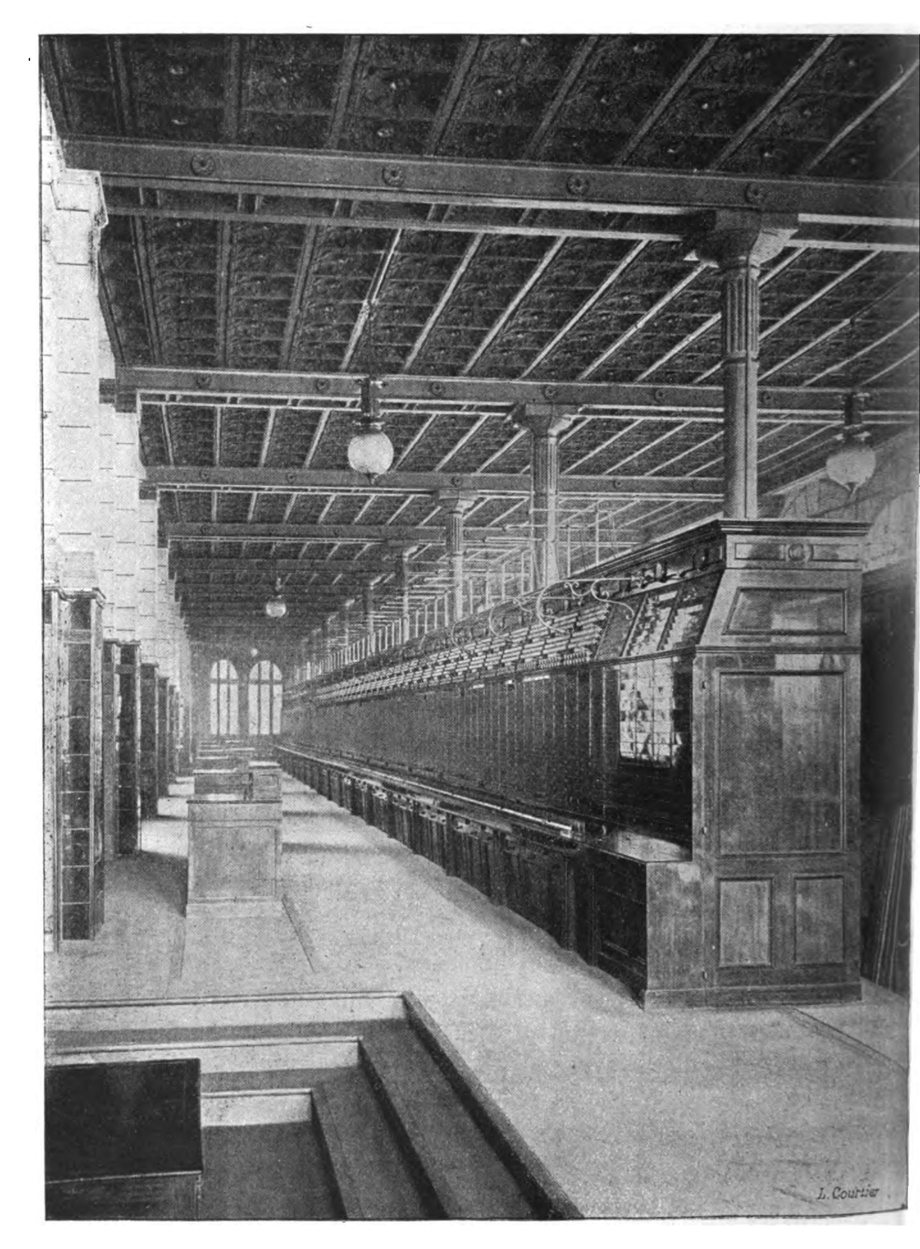


Fig. 18.

neau n° 2 les jacks individuels reproduisent la disposition des annonciateurs formant la sous-division inférieure du même groupe; les deux bandes gauche et droite, de 15 jacks, sont peintes en rouge, la bande centrale en blanc. La téléphoniste de gauche, à laquelle incombe la surveillance des annonciateurs individuels de gauche, trouve donc instantanément le jack correspondant à un appel. La téléphoniste centrale, dans les panneaux 4 et 5, trouve avec la même facilité et grâce aux mêmes artifices les jacks associés aux annonciateurs du groupe médian. Les derniers jacks individuels de la section, ceux des panneaux 6 et 7, sont disposés d'une façon identique par rapport aux annonciateurs du groupe de droite.

Enfin la tablette des clefs et fiches, horizontale et en saillie à une dizaine de centimètres au-dessous des jacks individuels inférieurs, complète le meuble de la manière ordinaire. Elle présente néanmoins (*fig.* 19) une particularité qu'il convient de noter. En réalité, elle se compose de deux tablettes : 1° la tablette des fiches, postérieure, fixe, attenant au corps du meuble et dans laquelle sont pratiquées les alvéoles où reposent les fiches; 2° la tablette des clefs, antérieure, mobile autour de charnières la reliant à la première et permettant une rapide inspection des clefs quand besoin est. Elle est en outre, dans chaque section, divisée en trois parties, correspondant chacune à l'une des trois places d'opérateurs ménagées dans la section. Chaque tablette élémentaire porte 16 jeux de clefs d'écoute et de clefs d'appel reliés aux 16 paires de fiches accordées à chaque opérateur et aux 16 annonciateurs de fin de conversation (à volets peints en bleu) que nous avons vus rangés au bas des groupes

d'annonciateurs individuels. Incidemment nous remarquerons que, dans la position normale de la tablette des clefs, celle-ci forme le couvercle d'une boîte close à l'avant par un rebord pouvant se rabattre à charnière; des volets amovibles, dont la partie basse était cachée sur les figures précédentes 17 et 18 par un faux plancher surélevant le sol en dehors du meuble, masquent les cordons et ferment celui-ci, en sorte qu'on obvie de ce côté, dans la mesure du possible, à la pénétration de la poussière dans l'ensemble des organes, jacks, clefs, etc., dont il est garni.

Il est bon, l'agencement général du meuble étant maintenant connu, de noter les avantages résultant du rappel et du blocage électrique des volets d'annonciateurs ou, plus généralement, de la suppression d'opérations manuelles ayant pour but exclusif d'assurer le fonctionnement des organes signaleurs. Deux questions préoccupent ceux qui ont charge de réseaux téléphoniques importants : 1° accélérer le travail et le rendre plus sûr en simplifiant les manœuvres; 2° satisfaire aux besoins d'abonnés de plus en plus nombreux en évitant, aussi longtemps que faire se pourra, de compliquer et retarder le service par des renvois de ligne à ligne, des répétitions d'ordres et de manœuvres toujours dilatoires, généralement incertaines et le plus souvent onéreuses. Tout écourtement du temps indispensable à l'établissement et même à la rupture des communications est un gain : tout accroissement du nombre d'abonnés qui peuvent être desservis directement, par un seul opérateur, sans retard et sans intermédiaire, constitue un accroissement dans la puissance et l'efficacité du réseau. Dès lors si, au cours d'une manœuvre à laquelle nous ne

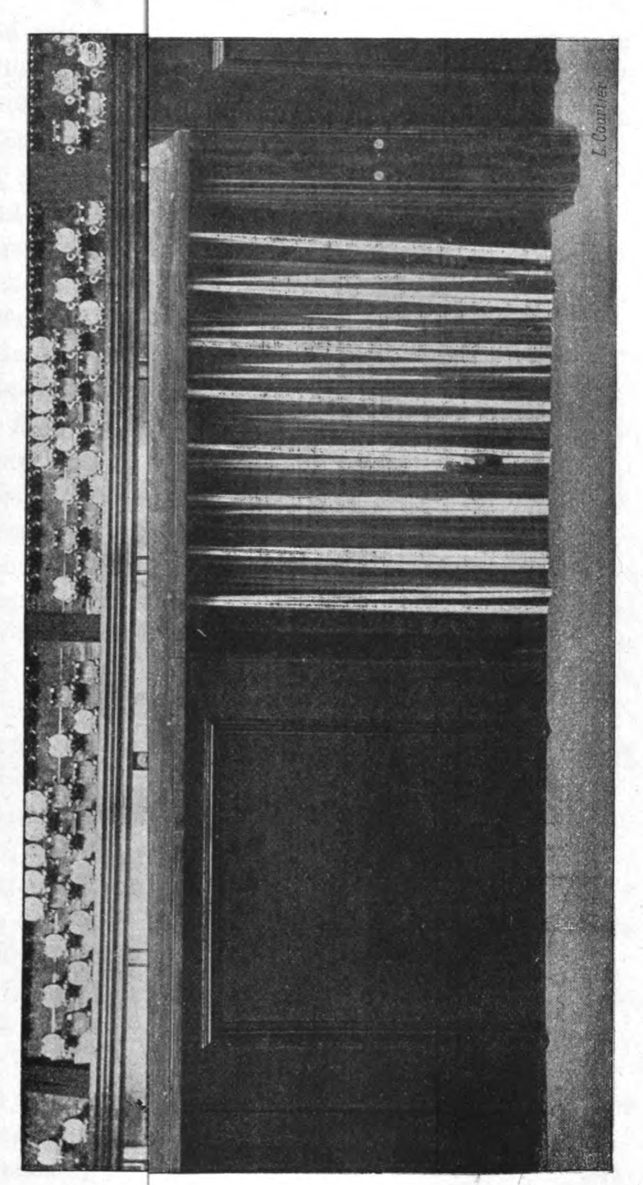


Fig. 19.

pouvons nous soustraire, comme l'enfoncement d'une fiche dans un jack, nous atteignons *simultanément* et le résultat qui en est la raison immédiate et tel autre effet nécessaire qui eût exigé une manœuvre séparée, du même coup nous obtenons ce gain. De même si, toutes choses égales d'ailleurs, nous augmentons la capacité du multiple, nous bénéficions de cet accroissement de puissance. Or du fait que l'insertion d'une fiche rappelle et bloque un volet tombé (ligne du demandeur), bloque un volet (ligne du demandé) que le signal de fin de conversation ne doit pas actionner, du fait que la manœuvre de la clef d'écoute, en fin de conversation, restaure l'annonciateur de fin dans la position d'attente, il résulte que deux manœuvres (remise au repos des volets d'annonciateurs) deviennent inutiles et sont économisées, sans pourtant que l'annonciateur de l'appelé ait fourni un faux signal. En outre, de ce que le rappel et le blocage des volets est opéré électriquement et à distance, il suit qu'on peut placer tous les annonciateurs hors de l'atteinte, bien qu'en vue, de l'opérateur, réserver dès lors la totalité de la surface à sa portée pour placer des jacks, augmenter ainsi la hauteur disponible des panneaux (*fig.* 20) de celle qu'occuperait la caisse des annonciateurs au-dessous de ces panneaux et accroître par là, dans une mesure très appréciable, la capacité du multiple.

Le commutateur placé au 3e étage de l'Hôtel de la rue Gutenberg présente les cotes suivantes :

Du faux plancher sur lequel reposent les chaises des téléphonistes au dessus de la tablette des clefs. . . . . $0^m,70$

Du dessus de la tablette des clefs à la rangée la plus basse de jacks individuels. 0m,11

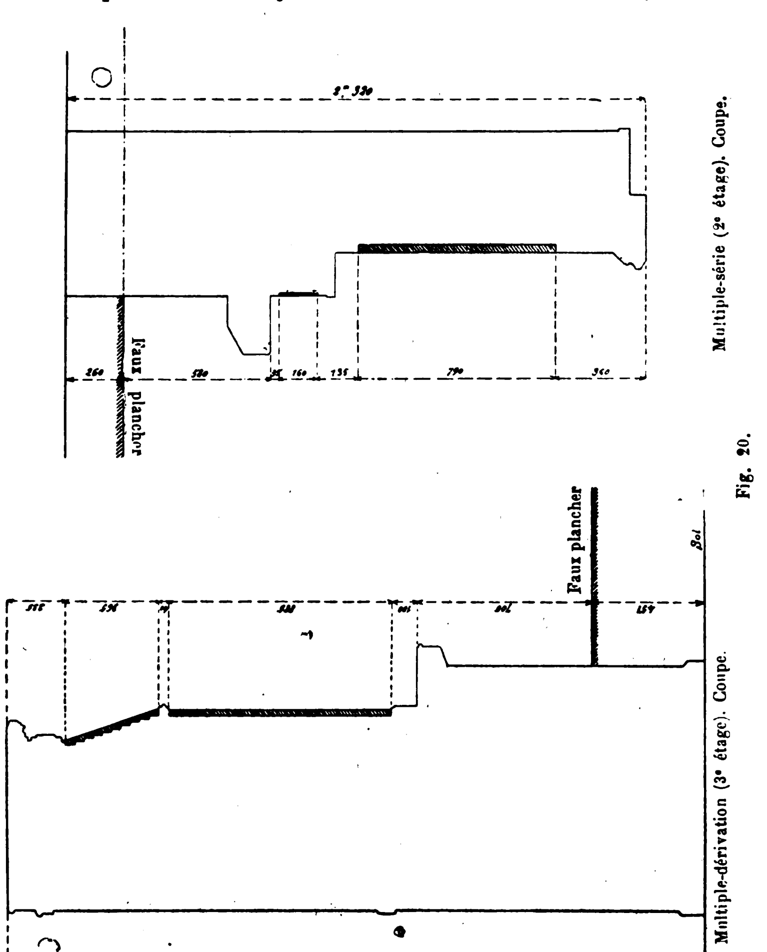


Fig. 20.

Du dessus de la tablette des clefs au centre de la rangée supérieure de jacks généraux. 0m,958

Hauteur totale de la rangée supérieure des jacks généraux au-dessus du faux plancher. 1m,658

Par conséquent c'est dans des panneaux de 0m,885 de haut, d'un développement total de 1m,79 en largeur, qu'on possède dès aujourd'hui, en outre des jacks individuels, 9000 jacks généraux, dont le plus élevé se trouve à 1m,658 au-dessus du plancher.

En résumé le multiple-dérivation avec annonciateurs à rappel électrique permet :

1° De supprimer les risques de mauvais contacts dans les jacks.

2° De supprimer l'obligation dispendieuse de ramener les lignes des jacks généraux, par des câbles de grande longueur, vers les jacks et annonciateurs individuels.

3° D'éliminer par suite la capacité supplémentaire imposée aux conducteurs par ce surcroît de longueur.

4° De réduire le nombre des manœuvres — et par suite d'accélérer le service — sans conduire à un fonctionnement intempestif des annonciateurs.

5° D'accroître, toutes choses égales d'ailleurs, la capacité dernière du multiple et de reculer par là même la limite au delà de laquelle on est contraint d'employer des lignes auxiliaires.

Nous allons maintenant passer rapidement en revue quelques dispositions accessoires du meuble et certaines installations auxiliaires faites dans l'Hôtel de la rue Gutenberg.

Répartiteur intermédiaire. — Ce n'est pas sans hésitation que nous classons le répartiteur intermédiaire parmi les dispositifs accessoires et nous tenons à ne laisser subsister sur l'importance de cet appareil,

annexe du multiple, aucune ambiguité. S'il n'est pas, en bonne exploitation du moins, d'une utilité *immédiatement* prochaine lors de l'établissement du multiple; si, dans des bureaux récemment équipés et dans plusieurs autres dont le montage est prochain, on ne le trouve pas sous l'une des formes auxquelles on était accoutumé, il n'en subsiste pas moins comme la base indispensable, en ce qui concerne l'équipement des bureaux, d'une exploitation rationnelle et économique. L'intérêt n'en est pas inférieur à celui du répartiteur d'entrée. En effet, que doivent rechercher les fonctionnaires dirigeants dans une entreprise téléphonique? Assurer le meilleur service possible au meilleur compte. Et cette formule, dont on pourrait considérer la dernière partie comme visant exclusivement les intérêts pécuniaires de l'entreprise, vise en réalité surtout l'intérêt de l'abonné : plus l'on peut réduire le nombre des téléphonistes, moins le service est éparpillé, plus il présente de garanties et, dans une certaine mesure, moins il revient cher. Or la judicieuse répartition, l'égalisation du travail, entre les différents opérateurs est, une fois le système de commutateur choisi, l'élément principal à considérer pour arriver à cette réduction et, nous devons l'ajouter, l'élément dont l'importance est le plus souvent méconnue et insoupçonnée. Il arrive très fréquemment, lorsque dans un bureau l'attention se trouve appelée sur ce point, que des comptages révèlent, toutes choses égales d'ailleurs, une incroyable inégalité entre les nombres de demandes de communications reçues dans chaque heure par les divers opérateurs. Souvent quelques opérateurs sont surchargés tandis que la plupart reçoivent un nombre de demandes

notablement inférieur à celui auquel ils devraient normalement satisfaire. Les statistiques de comptage permettent de rétablir l'équilibre et généralement de diminuer le personnel. S'il s'agit d'un bureau à équiper de nouveau, le nombre de sections à édifier est donc diminué, et la place disponible économisée dans le local est ainsi réservée pour les extensions ultérieures, reculant par là même la limite au delà de laquelle, pour le district desservi, il eût fallu créer tout à la fois un nouveau multiple et des lignes d'intercommunication ou de renvoi pour assurer les relations entre les *deux* meubles. Il serait facile de citer des cas où, par de prudents comptages, on fut conduit à réduire de 25 et de 30 pour 100, lors de la réinstallation d'un bureau, le nombre des sections primitivement projetées, c'est-à-dire à réaliser une économie équivalente sur les frais de *premier établissement* d'abord, sur *les frais d'entretien et d'exploitation* ensuite. Si donc le personnel dirigeant d'un réseau apprécie à sa juste valeur l'utilité des statistiques et, lors de l'établissement d'un multiple, équilibre, pour les différentes heures du jour, le travail entre les opérateurs présents, il doit, pour conserver les avantages obtenus au point de vue de l'économie et de l'exécution du service, se ménager les moyens de rétablir l'équilibre qui tend constamment à se rompre. En effet, les besoins de chacun varient de jour en jour et tel qui demandait très souvent d'autres abonnés, transforme ses affaires, n'a plus besoin d'autant d'informations et appelle beaucoup moins le bureau, tandis que tel autre, multipliant par exemple le nombre d'objets auxquels s'étend son commerce, doit corrélativement multiplier ses commandes, se renseigner sur le cours de denrées

qui précédemment lui importaient peu et sonnera le bureau quatre ou cinq fois plus qu'auparavant (*). Comme la diminution des appels des uns, dans un même groupe dont les appels sont surveillés par un même opérateur, ne saurait, sans une coïncidence particulièrement heureuse et bien rare dans la réalité, compenser le surcroît de demandes des autres, le travail des opérateurs se déséquilibre et, s'il n'est pourvu au mal, retourne à une inégalité préjudiciable à tous. Il y a donc nécessité, et c'est parce qu'on l'a, croyons-nous, trop souvent méconnu que nous insistons sur ce point, à disposer, pour la liaison des annonciateurs et jacks individuels aux lignes de jacks généraux, un organe de commutation qui permette de transférer devant un autre opérateur ou dans une autre section, sur un autre groupe d' « annonciateur et jack individuels », telle ligne d'abonné devenue soit trop, soit pas assez, chargée en demandes de communications, et de maintenir une bonne répartition du travail. C'est ce qu'on appelle le *répartiteur intermédiaire*. On le rencontre sous une certaine forme dans les constructions récentes auxquelles nous avons fait allusion. Dans les deux multiples dont il a été question ci-dessus, surtout dans celui du deuxième étage, il apparaît avec toute la simplicité de son principe. Dans l'un et l'autre, il est constitué par un long panneau en bois placé à l'arrière et au bas du multiple (voir *fig*. 28) au-dessous des câbles et des portions de cordons qui les suivent. Les figures 21 et 22 montrent la disposition du répartiteur intermédiaire du deuxième étage. Des baïonnettes, A B C D (*fig*. 23, 24) étamées

(*) Certaines modifications de taxes peuvent amener de très brusques perturbations de ce genre.

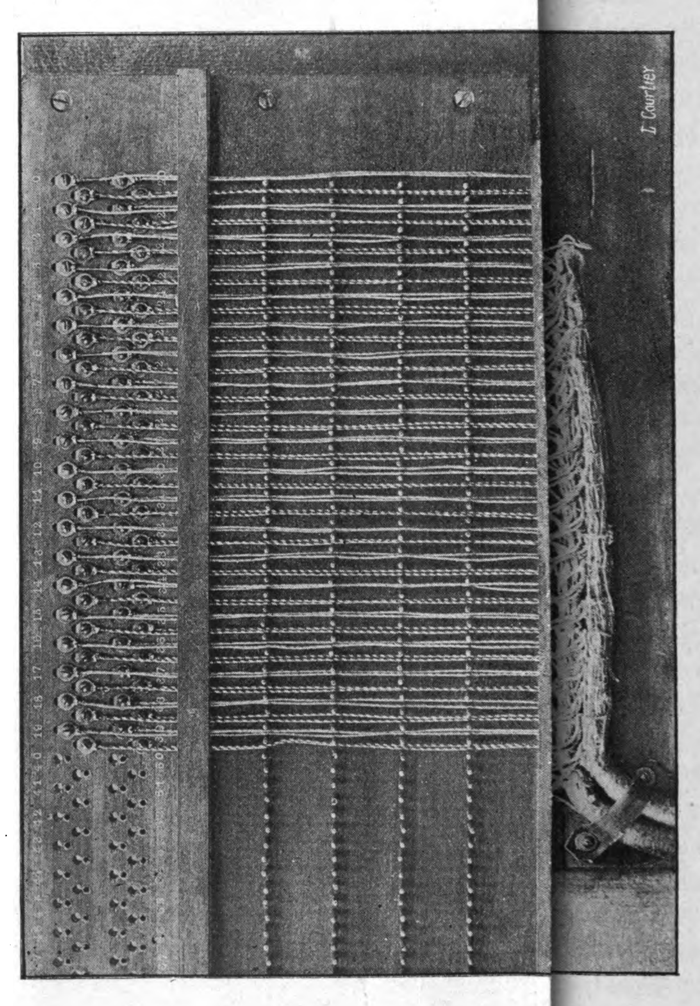


Fig. 22.

aux deux bouts, traversent le panneau, sur lequel elles sont fixées vers l'extérieur par des vis V, et sont rangées moitié en haut, moitié en bas, suivant huit lignes horizontales; aux extrémités intérieures D sont soudées (*fig.* 22) les câbles venant soit des lignes de jacks généraux (baïonnettes inférieures), soit des annonciateurs et jacks individuels (baïonnettes supérieures) : les conducteurs des câbles ayant été ainsi renvoyés complètement à l'arrière du meuble, à portée de la main, on comprend qu'il soit aisé de mener, le long du panneau, des fils de raccordement entre une baïonnette supérieure quelconque et une baïonnette inférieure également quelconque, c'est-à-dire entre un ensemble « annonciateur et jack individuels », choisi à volonté, et une ligne d'abonné. La figure 21 représente l'arrière, c'est-à-dire le côté extérieur, du panneau à l'époque où l'on vient de terminer le montage. On s'arrange naturellement pour que, à ce moment, les fils de renvoi soient le plus courts possible et le numérotage nouvellement donné aux abonnés est tel que chaque ligne de multiple aboutisse à des baïonnettes dont les correspondantes, comme baïonnettes individuelles, se trouvent sur une même verticale. Dans ces conditions, les fils de renvoi montent directement des unes aux autres, en passant à travers de

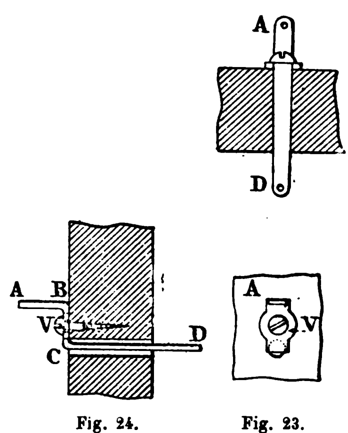
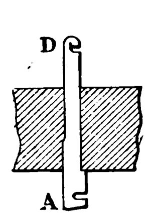


Fig. 24. Fig. 23.

petits trous ménagés dans deux étroites traverses horizontales en saillie sur les panneaux. Ultérieurement, si les appels d'un abonné doivent être transférés sur un autre groupe « annonciateur-jack », on enlève les fils verticaux de renvoi primitifs, on soude d'autres fils aux baïonnettes de ligne, on les passe dans les trous de la traverse inférieure devenus libres, puis on les mène, dans l'espèce de caniveau formé par les deux traverses, jusqu'aux trous de la traverse supérieure correspondant aux baïonnettes du nouveau groupe « annonciateur-jack ». De cette façon, sans que le numéro des jacks généraux de l'abonné, c'est-à-dire sans que le numéro de l'abonné ait changé, les appels de l'abonné sont transférés à un autre opérateur; il n'y a qu'à consigner le changement sur un répertoire. On doit se rappeler qu'au point de vue du service il n'y a *aucune relation* entre le numéro des jacks généraux et la position des annonciateurs ou jacks individuels qui souvent ne portent même aucun numéro et se correspondent simplement entre eux.



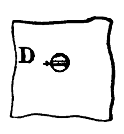


Fig. 25.

Au troisième étage on a employé des baïonnettes droites (*fig.* 25) qu'il suffit d'enfoncer comme des clous dans les trous dont est percé le panneau et qui y sont maintenues par les renflements dont elles sont munies. Le groupement ici diffère (fig. 26 et 27) de celui qui vient d'être indiqué pour le deuxième étage et l'on ne trouve plus de caniveau horizontal formé par des traverses. Les figures 26 (face avant ou intérieure) et 27 (face arrière ou extérieure) qui représentent les baïonnettes affectées à un tiers de


LIBRARY

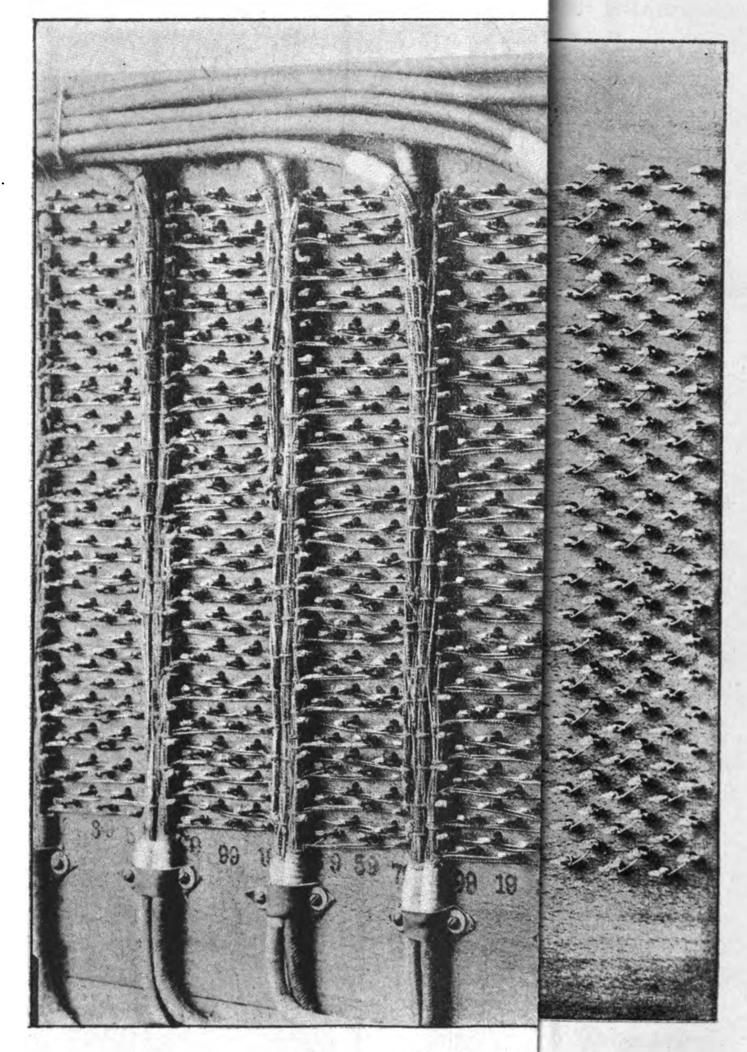


Fig. 26.

section font voir celles-ci groupées en cinq colonnes qui correspondent chacune à 20 lignes. Les câbles de jacks généraux, arrivant par le bas (*fig.* 26), se divisent le long et à gauche de ces colonnes sur les rangées de trois baïonnettes qui font saillie sur la droite, tandis que les câbles d'annonciateurs et jacks individuels, arrivant par le haut du panneau, descendent à droite des colonnes et s'y divisent sur les rangées de baïonnettes faisant saillie à gauche et intercalées entre les rangées précédentes. A l'arrière du panneau (*fig.* 27) les baïonnettes de deux rangées consécutives se trouvent tout naturellement groupées par paires . il suffit, pour relier une baïonnette-ligne à une baïonnette-annonciateur, de souder aux deux un fil de renvoi oblique très court. Les transferts se font comme ci-dessus, à cela près que les nouveaux fils de renvoi, partant des baïonnettes, doivent suivre un chemin tout à fait semblable à celui des câbles de la face avant, et, après un petit parcours horizontal, être logés dans les intervalles des colonnes. Cette disposition, surtout si l'on tient compte que les nouveaux fils de renvoi ne sauraient être réunis avec la régularité des conducteurs d'un câble, est beaucoup moins favorable que la précédente à l'ordre et à la netteté des renvois. Jusqu'à plus ample informé et sauf le cas où le défaut d'espace oblige à grouper les baïonnettes de cette façon, nous considérons l'agencement du répartiteur intermédiaire au deuxième étage comme répondant nettement mieux au rôle de répartiteur intermédiaire.

Câbles de multiples. — Le câblage des jacks généraux est, au deuxième étage, effectué à l'aide de

câbles à 21 paires du type ancien bien connu, reposant sur des tiges horizontales amovibles. Au troisième étage, les câbles sont formés de 21 groupes de trois conducteurs en cuivre de $0^{mm},65$ de diamètre, recouverts individuellement de couches de soie et de coton. Les 21 groupes de trois, les 21 tierces comme on tend à dire, sont câblés à leur tour, recouverts de rubans de plomb et de tresses de coton et forment en fin de compte un câble ovale de 15^{mm} d'épaisseur et de 20^{mm} de large. Les câbles (voir *fig.* 28), entassés à la partie postérieure du meuble, y sont disposés par nappes de 14, soutenues chacune, de deux en deux séparations de panneaux, par des tringles articulées en arrière de ces séparations. Les tringles correspondant à deux nappes consécutives alternent, en sorte que les crochets qui en constituent les extrémités retiennent toujours deux nappes, celle qui repose directement sur la tringle considérée et celle qui, au-dessus d'elle, est supportée par les deux tringles situées à droite et à gauche au niveau des séparations voisines. Les tringles, pouvant recevoir un mouvement de rotation dans un plan vertical, servent à soulever aisément les nappes de câbles. Lorsqu'on doit, par exemple, visiter les attaches des jacks généraux de la première rangée inférieure, on soulève successivement, à partir du haut, les tringles des diverses nappes de part et d'autre du panneau où se trouve la réglette intéressée (*), on pousse un peu vers l'avant le câble correspondant à la réglette et l'on profite du mou communiqué ainsi aux fils de

(*) L'appareil est d'ailleurs disposé de manière qu'on puisse pendant l'opération placer des montants supplémentaires servant de supports pour les extrémités libres des tringles soulevées.

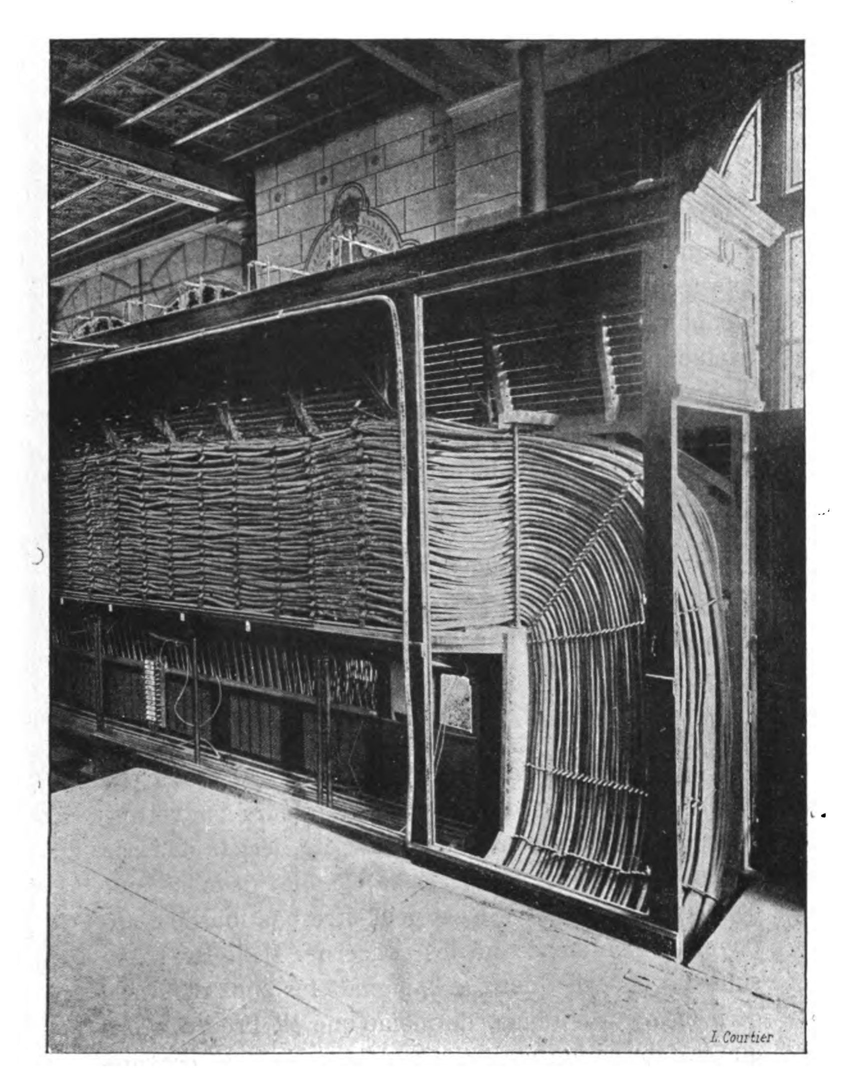


Fig. 28.

raccord pour tirer celle-ci en avant du meuble, l'examiner et faire au besoin la réparation nécessaire. Le

peigne formé par les fils soudés même aux jacks des réglettes les moins favorablement placées permet ainsi de porter de 5 centimètres en avant du panneau l'arrière des jacks qui la composent.

Fermeture à l'arrière. — Au deuxième étage des rideaux mobiles en bois, au troisième étage des volets ferment le meuble à la partie postérieure et préviennent de ce côté, dans la mesure du possible, l'introduction de la poussière. Des prises d'air comprimé, ménagées dans toutes les salles, permettent en outre de « souffler » rapidement un grand nombre de jacks et d'en chasser ainsi la poussière qui, malgré les précautions prises, vient à s'y introduire.

Microphones et téléphones. — Les microphones sont du type dit « solid back ». Les téléphones sont des téléphones-montres Ader montés sur ressorts serre-tête.

Accumulateurs. — Les microphones, comme d'ailleurs les circuits de relèvement, sont alimentés par des accumulateurs Blot, dits accumulateurs à navettes. Nous ne croyons pas qu'ils aient été décrits dans ce Journal et comme l'expérience semble jusqu'ici leur être très favorable, il n'est peut-être pas inutile d'appuyer un peu sur ce qui les concerne. M. le Dr. d'Arsonval a (*), voici deux ans, signalé les bons résultats qu'il en avait obtenus, de même que M. Preece, alors que la fabrication était à son début. Nous ne croyons pouvoir faire mieux que de reproduire l'exposé très

(*) *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, t. XIII, 1896, p. 66.

net de M. d'Arsonval : « L'accumulateur Blot est du type Planté pur. Il ne renferme aucun oxyde rapporté ni à titre définitif, ni à titre temporaire. Le foisonnement n'y est point contrarié, mais simplement dirigé, puisque c'est un mal nécessaire. Il n'y a aucun principe nouveau : la multiplication des surfaces par rubanage et par gaufrage, les matériaux employés dans la construction, les réactions chimiques, tout est connu. Un seul point nouveau : la façon d'attacher et de suspendre les rubans de plomb pour qu'ils soient libres de se dilater en tous sens : longueur, largeur, épaisseur, sans fatiguer les soudures ou déformer le cadre qui les enveloppe. Un simple tour de main, un artifice de fabrication, un rien en un mot, et ce rien, ainsi qu'il arrive souvent en pratique, a complètement modifié les résultats comme on le verra ci-dessous.

La base de l'accumulateur Blot est la navette. La navette élémentaire porte, enroulés (*fig.* 29) autour de son âme *a*, *a*, deux rubans de plomb pur D et C, dont l'un D est gaufré et strié, l'autre C gaufré seulement. La navette est en plomb antimonié non attaquable. La surface offerte à l'action chimique est très grande. Avec des rubans de 1^{mm} d'épaisseur, 1 mètre carré de surface active pèse 3 kilogrammes seulement.

La navette, enroulée comme l'indique la fig. 30, est sciée en deux parties égales suivant la ligne *ab*, et chaque moitié forme la navette élémentaire. En réunissant ensemble plusieurs navettes semblables dans un cadre en plomb antimonié, on constitue une plaque (*fig.* 31) de dimensions variables. Les soudures S en plomb antimonié maintiennent l'axe des navettes sur le cadre MNOP; les soudures S' assurent la conductibilité électrique de tous les rubans de plomb. Cette

soudure unique et la place qu'elle occupe expliquent pourquoi les lames actives peuvent se dilater dans tous les sens sans tirer ni sur la soudure, ni sur le cadre.

Ce cadre conserve forcément sa forme géométrique quel que soit le régime auquel on soumet la navette élémentaire. Le court circuit, soit accidentel, soit fréquemment répété, comme je l'ai fait sur ma batterie, ne m'a pas donné la moindre déformation de l'élément.

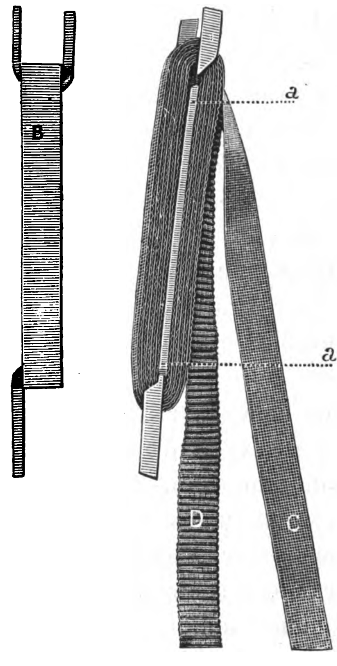


Fig. 29.

Les plaques adoptées par M. Blot sont de deux dimensions : la plaque demi - unitaire (*fig.* 31) formée de 4 navettes élémentaires, et la plaque unitaire qui en contient 8.

Les plaques sont suspendues à un cadre en plomb dur portant deux lames de glace sur lesquelles viennent reposer les talons qui les terminent (voir *fig.* 32).

Les lames se trouvent ainsi suspendues dans la cuve contenant l'électrolyte et s'y trouvent complètement immergées. Des tubes de verre séparent les plaques actives les unes des autres. La fig. 32 rend ce montage évident.

M. Blot appelle plaque unitaire celle dont la sur-

face active est de 1 mètre carré. Son poids est de 3 kilogrammes.

Chaque élément de la batterie sur laquelle ont porté mes essais se compose de 9 plaques demi-unitaires (4 positives et 5 négatives), dont le poids total est, en moyenne, de 13 kg. 500, connexions comprises.

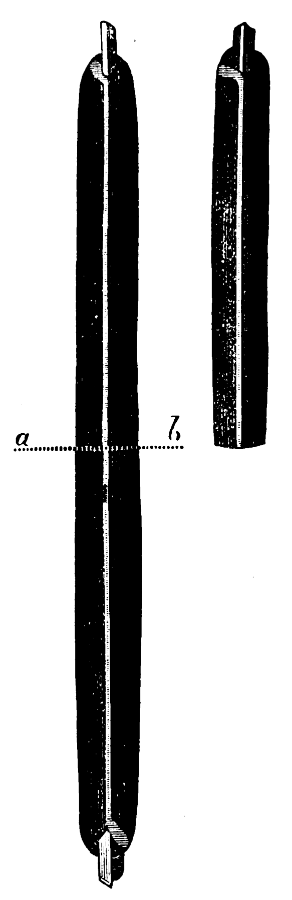


Fig. 30.

Cette batterie a toujours été chargée au régime de 25 à 30 ampères, débit maximum de ma machine Gramme. Si le régime de charge a été à peu près constant, il n'en est pas de même du régime de décharge. J'ai demandé à cette batterie des courants dont l'intensité a varié de 20 milliampères à plus de 250 ampères. Quatre de ces éléments ont été soumis à des courts circuits répétés ayant duré vingt-quatre heures pour l'un d'eux et huit jours pour un autre. A part un léger allongement des rubans positifs, je n'ai constaté aucune détérioration de ces éléments. Chargés de nouveau à refus, ils se sont comportés comme leurs voisins et continuent leur service normal.

Je n'ai pas constaté de dépôt d'oxyde au fond des

vases qui, étant simplement recouverts d'huile minérale, contiennent une légère couche de poussière provenant du balayage de la salle.

La force électro-motrice de ces éléments surmenés est la même que celle de leurs congénères.

Il en est de même de la capacité utilisable qui oscille entre 127 et 131 ampères-heure par élément au débit de 10 ampères.

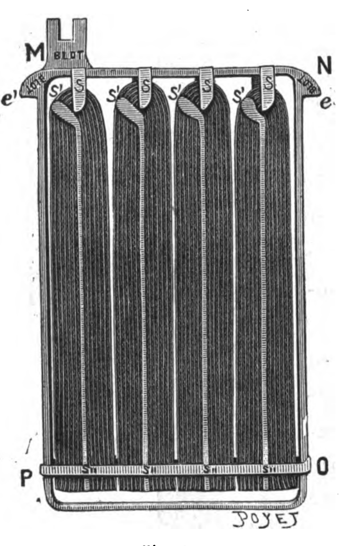


Fig. 31.

Ils conservent très bien leur charge ; les ayant chargés à refus le 22 juillet, à mon départ de Paris, j'ai pu m'en servir le 20 octobre et encore le 17 novembre sans avoir eu besoin de les recharger.

Je n'ai pas effectué de mesures systématiques ni pour la capacité ni pour le rendement. Je tenais avant tout à m'assurer de la solidité de cet accumulateur et de l'élasticité de son régime de décharge.

Je savais que ces mesures se faisaient rigoureusement et simultanément à Paris au Laboratoire central d'électricité et au Post-Office de Londres. Au moment de faire cette présentation, j'ai demandé des renseignements à ces deux établissements. D'après les chiffres trouvés par M. de Nerville (certificat 452 *ter* en date du 28 mai 1895), la capacité d'un élément, qui était de 12 ampères-heure par kilogramme le

12 mars 1895, avait atteint 13,8 ampères-heure le 25 mai.

Quant au rendement, il était de 0,93 en quantité et de 0,76 en énergie, au débit de 1 ampère par kilogramme d'électrodes, et de 0,96 en quantité et 0,84 en énergie, au régime de 0,5 ampère au kilogramme.

Voici quels sont les rendements à divers régimes de décharge :

Ampères par kilogramme.	Rendement p. 100.
1	89
2	80
3	68
5	50
6	45

D'autres essais, faits au même établissement, ont donné :

Régime de décharge au kilogramme d'électrodes.	Capacité utilisable au kilogramme d'électrodes.
amp.	amp.
0,5	15
0,67	14,2
1	14
1,73	12

M. Blot garantit 10 ampères-heure au kilogramme au régime de 1 ampère au kilogramme : on voit qu'il reste au-dessous de la vérité.

Les essais, faits au Laboratoire du Post-Office, sont beaucoup plus nombreux et beaucoup plus variés. M. Preece m'a communiqué trois séries d'essais : la première allant du 28 février au 1er juillet 1895; la deuxième, du 4 juillet au 2 décembre; la troisième, du 1er décembre 1895 au 1er janvier 1896. Je ne peux

songer à donner ici les tableaux d'expériences qui remplissent plus de trente pages. Les régimes de décharge ont été poussés jusqu'à 5,6 ampères au kilogramme. Des expériences sur les courts circuits ont été faites, et voici ce que dit de l'une d'entre elles le rapporteur M. Probert :

« En outre des expériences à régime excessif de charge et de décharge, un essai on ne peut plus rigoureux a été fait pour essayer la résistance mécanique et éprouver les qualités électriques de ces éléments.

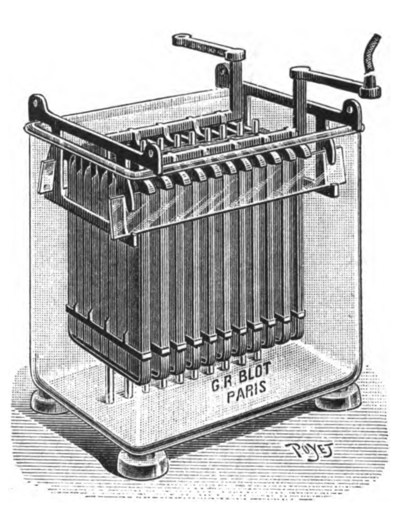


Fig. 32.

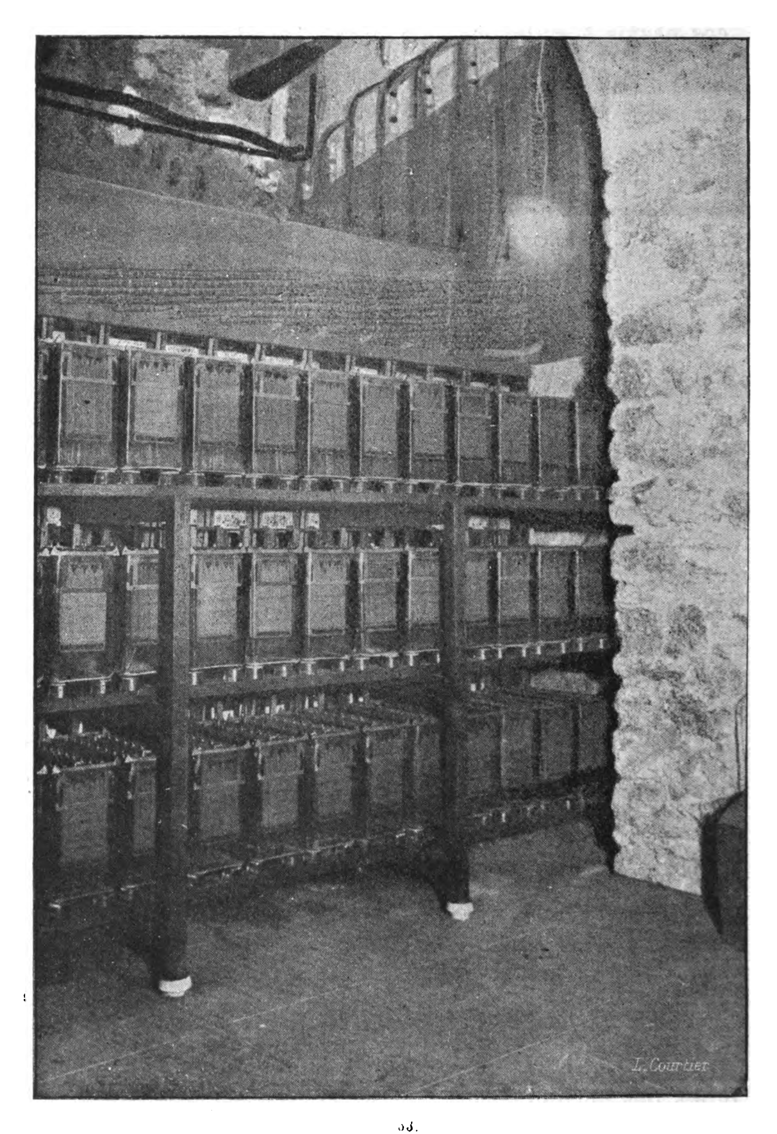
« L'élément (type 10 kilogrammes) a été mis en court circuit pendant dix minutes. Il a produit un courant maximum de 200 ampères, et a été déchargé ensuite jusqu'à 0,02 volt ; l'élément entièrement déchargé dans ces conditions a été alors abandonné à lui-même pendant douze jours, puis une autre expérience a été faite au régime de charge de 28,2 ampères, et au régime de décharge de 22 ampères. Dans ces conditions, le rendement en capacité a été de 79,2 pour 100, et celui en énergie de 64,8 pour 100, ce que je considère comme particulièrement bon après d'aussi rigoureuses épreuves. »

M. Probert ajoute que l'élément démonté, après

ces essais à outrance, a montré des plaques en parfait état, ayant encore une grande provision de métal pur, assurant à l'élément une longue période d'action.

Les expériences longues (elles ont duré un an) et minutieuses, faites au Post-Office, concordent donc parfaitement avec les faits que j'ai observés, de mon côté, au point de vue de la résistance et de l'élasticité de l'accumulateur Blot. »

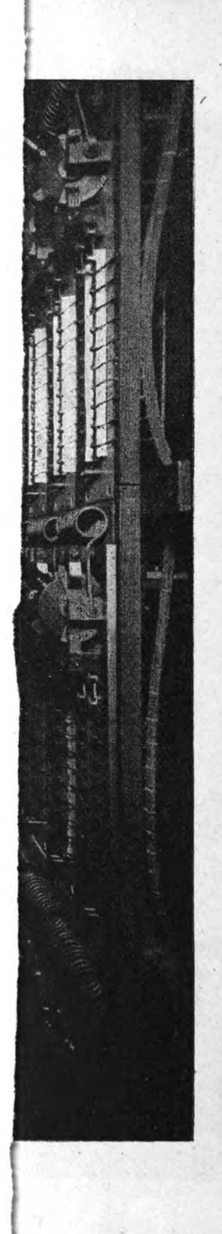
Les accumulateurs Blot, en service à l'Hôtel des Téléphones, sont du type dit demi-unitaire. On distingue, dans la fig. 33, à quoi se réduit l'effet du foisonnement; dans le second élément de la seconde rangée, qui, par suite de circonstances particulières, a travaillé davantage que les deux éléments voisins, on voit les demi-navettes, qui se sont allongées et arrivent plus près du fond du vase que dans ceux-ci. L'installation, faite en septembre et octobre 1896, comporte : 1° pour le relèvement, 2 batteries (une en service, l'autre en charge ou au repos) de 32 éléments chacune, les éléments étant groupés par 2 en tension; 2° pour les microphones, 84 éléments dont 42 en service et 42 en charge ou au repos. Chaque accumulateur de microphone dessert 10 circuits microphoniques branchés pour ainsi dire aux pôles mêmes des accumulateurs : ceci, on le sait, est de première importance si l'on veut éviter entre plusieurs postes microphoniques le mélange des transmissions. C'est une économie mal entendue, et à laquelle l'expérience conduit d'ailleurs à renoncer, que de prolonger les pôles des accumulateurs jusque dans les salles d'exploitation à l'aide de fils, fussent-ils d'un diamètre déjà fort, et de faire rayonner ensuite, de leurs extré-



33.

mités, les circuits de microphones. Comme nous avons





eu l'occasion de le signaler ailleurs (*), l'expérience montre que des conducteurs d'alimentation constitués par du fil de cuivre de 5 millimètres et longs seulement de 15 mètres, c'est-à-dire ayant, aller et retour, environ $0^{\omega},02$ de résistance, suffisent pour que les postes s'entendent légèrement les uns des autres. Il est, du reste, contradictoire de chercher un générateur d'électricité à résistance intérieure aussi faible que possible, et d'augmenter ensuite pratiquement celle-ci par l'intercalation d'une résistance supplémentaire avant les bornes d'attache. Au contraire, si, pendant la décharge, le pôle de l'accumulateur est représenté par une barre de cuivre de 2 centimètres carrés de section et ayant, même sur une longueur de 2 ou 3 mètres, une résistance électrique presque nulle, on peut greffer, *sur ces barres mêmes*, des circuits formés de fils de cuivre de $1^{mm},5$ de diamètre, convenablement isolés, et les relier à des microphones distants de 30 mètres, sans que les transmissions soient le moins du monde influencées les unes par les autres. C'est dans cet ordre d'idées qu'est fait, à l'Hôtel des Téléphones, le montage des accumulateurs. Les figures 33, 34 et 35 montrent quelle est l'installation. Les gros commutateurs qu'on aperçoit dans la fig. 34 permettent de relier (*fig.* 35) l'accumulateur A, par les prises P,N soit au circuit de charge EF, soit aux barres CD, sur lesquelles sont raccordés les circuits de microphones. Pendant la charge, les bornes P_1N_1 sont reliées par le commutateur aux bornes EF ; pendant la décharge, les mêmes bornes sont reliées aux barres CD et le rhéostat R est intercalé dans le circuit de

(*) *Annales télégraphiques*, t. XXI, 1894, p. 447.

charge. Lorsque le commutateur est dans la position de repos, les bornes P_1N_1 reliées aux pôles + et — de l'élément sont isolées des circuits de charge et de décharge et le commutateur intercale entre les bornes EF le rhéostat R qui remplace l'élément isolé. On peut ainsi retirer à volonté du circuit de charge un élément quelconque sans interrompre la charge des autres éléments.

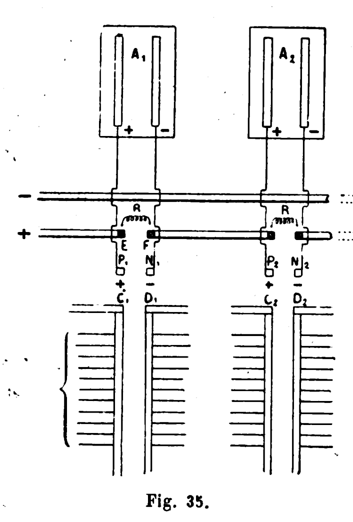


Fig. 35.

Chauffage et aération. — Le chauffage et l'aération sont assurés au moyen d'aéro-calorifères du système d'Anthonay qui a été plus récemment adopté pour le nouvel Hôtel central des Téléphones de Bruxelles. Dans ce système, l'air, puisé où on le désire, dans les parties basses d'un édifice ou au-dessus de la corniche, est aspiré par un ventilateur et refoulé ensuite dans la canalisation d'aérage. Les croquis reproduits plus loin (*fig.* 36) indiquent suffisamment l'emplacement et la constitution essentielle des appareils. Les constructeurs, MM. Leroy et Cie, de Paris, avaient à chauffer nuit et jour un cube d'environ 18 000 mètres cubes à 18° par les temps les plus froids. A cet effet ils ont disposé dans le sous-sol :

1 ventilateur, pouvant par heure aspirer de l'exté-

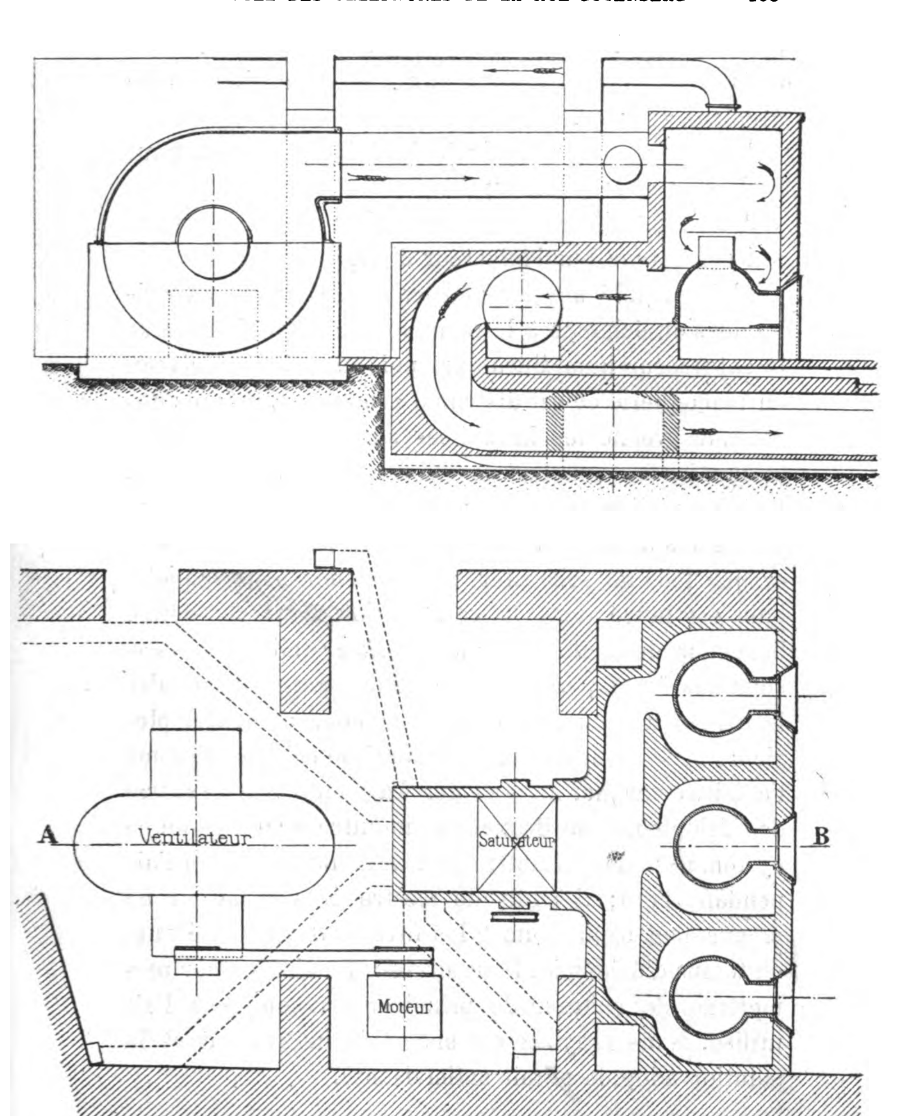


Fig. 36.

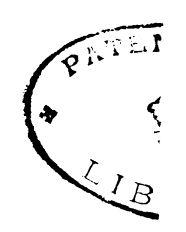
rieur 18 000 mètres cubes d'air frais et les insuffler sous une certaine pression sur 3 aéro-calorifères proprement dits;

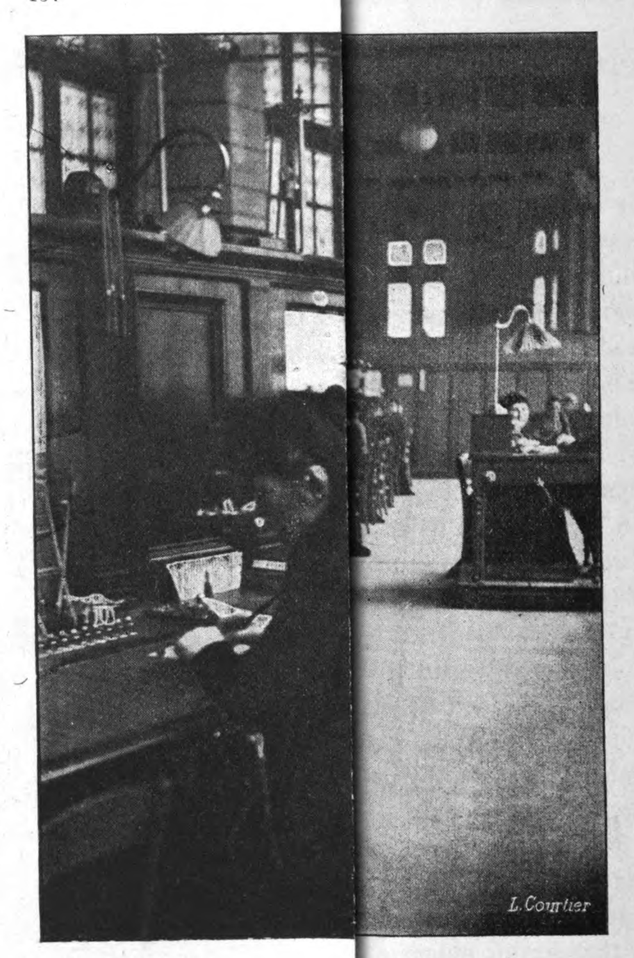
1 moteur à air comprimé, de 6 à 8 chevaux, pour actionner ce ventilateur;

3 aéro-calorifères proprement dits;

1 saturateur humidificateur d'air.

L'air insufflé sur les aéro-calorifères par le ventilateur s'en échappe à la température voulue, traverse le saturateur humidificateur, puis un grand caniveau en maçonnerie et est distribué sous pression dans des colonnes verticales branchées sur cette canalisation et munies de bouches de chaleur aux divers étages. Le renouvellement abondant de l'air empêche que les parois des aéro-calorifères ne soient portées au rouge et que l'air ne soit altéré; la pression sous laquelle l'air est lancé dans la canalisation générale donne beaucoup de facilité pour faire passer celle-ci au-dessous des foyers, c'est-à-dire pour loger et dissimuler le caniveau dans le sol et aussi pour alimenter plusieurs bouches de chaleur par la même colonne. Comme l'a fait remarquer M. Van der Aa pour l'Hôtel central des Téléphones de Bruxelles, un autre avantage de ce système est de permettre le rafraîchissement de l'air pendant l'été; il suffit de mettre le ventilateur en mouvement sans allumer les foyers. Il va de soi que, en temps d'épidémie, le saturateur humidificateur permettrait de charger de principes antiseptiques l'air utilisé. Nous croyons cet ensemble intéressant et la solution adoptée paraît satisfaisante.


LIB


L. Courtier

PREMIER ÉTAGE. — TÉLÉPHONIE INTERURBAINE.

Les lignes interurbaines aboutissent à des commutateurs du genre *standard* séparés par des tables de largeur équivalente afin que, pendant les heures les plus occupées, la téléphoniste chargée d'établir les communications soit libérée du travail d'écritures et qu'une autre téléphoniste lui soit adjointe pour assurer celui-ci.

Les figures 37 et 38 montrent l'ensemble et l'aménagement de la salle du premier étage. Les connexions n'ont rien de très particulier : à chaque ligne sont affectés deux jacks ; le premier, à rupture, est relié par les ressorts extérieurs aux deux fils de ligne ; les butoirs correspondants sont reliés à l'un des deux circuits d'un transformateur, le second circuit l'étant au second jack. Il arrive parfois qu'un défaut d'isolement sur une ligne urbaine, combiné avec un semblable défaut sur la grande ligne, rend bruyante la ligne résultante alors que chacune d'elles individuellement est silencieuse. Souvent la séparation des deux par un transformateur supprime pratiquement le défaut et, bien que la voix ne soit pas renforcée en elle-même, rend ainsi la conversation possible. Dès lors, quand tout marche normalement, on emploie pour les communications le premier jack, en éliminant ainsi toute liaison avec le transformateur; quand l'inconvénient signalé se produit, on intercale celui-ci par l'emploi du second jack.

Les communications interurbaines sont toujours établies sur l'ordre des téléphonistes interurbaines. Si la communication est à destination de Paris, la télé-

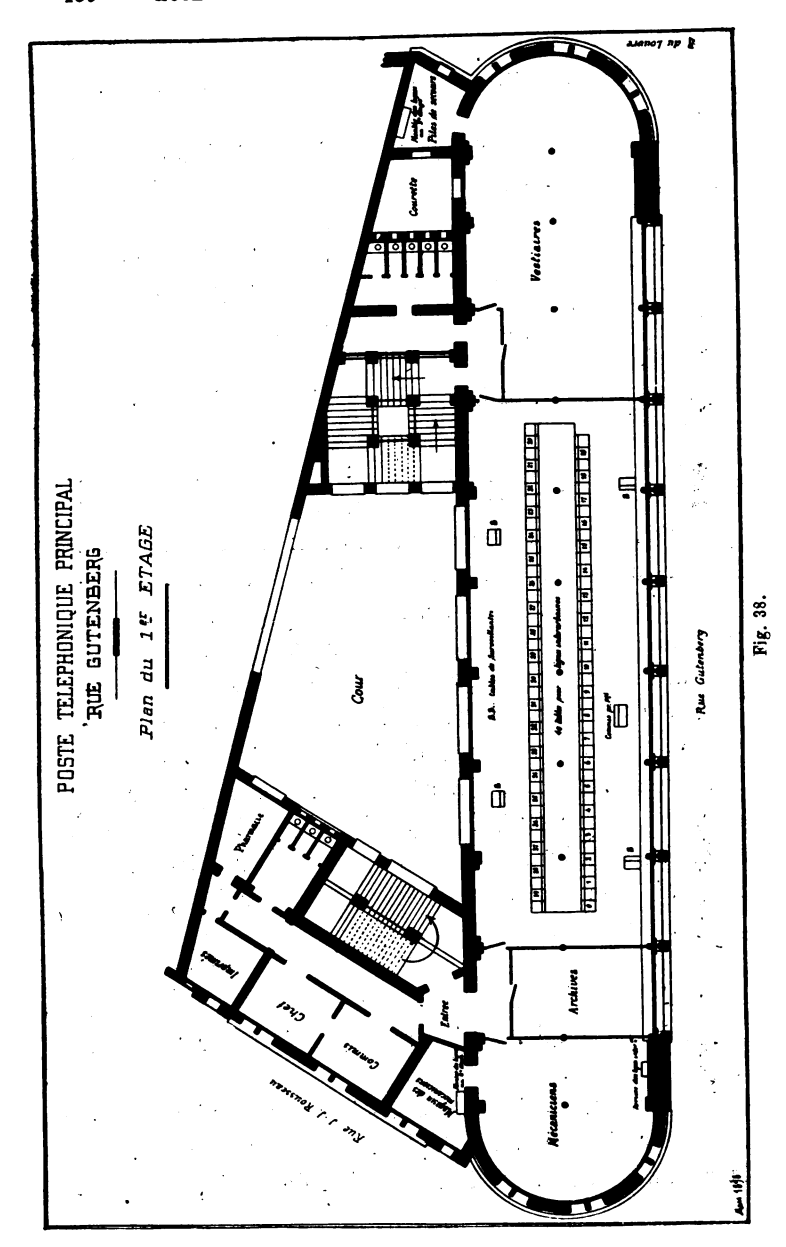

POSTE TELEPHONIQUE PRINCIPAL
RUE GUTENBERG
Plan du 1er ETAGE
R du Louvre
Courette
Vestiaires
Cour
Archives
Mécaniciens
Entrée
Pharmacie
Chef
Commis
Rue J. J. Rousseau
Rue Gutenberg

Fig. 38.

phoniste interurbaine, le moment venu, invite par un circuit de service une téléphoniste des « sections de rupture » à lui renvoyer, sur un circuit local qu'elle désigne, l'abonné à destination duquel est la demande. La téléphoniste interpellée obéit, et, comme les lignes urbaines sont représentées pour elle par des jacks à rupture, la ligne interurbaine se trouve renvoyée chez l'abonné par la portion strictement indispensable de la ligne urbaine, celle-ci étant débarrassée de toute la portion multiple dans le bureau du deuxième ou celui du troisième étage. Les figures 39 et 40 représentent un jack à rupture et une réglette de jacks à rupture, tous deux assez différents des jacks et réglettes ordinaires représentés figures 15 et 16.

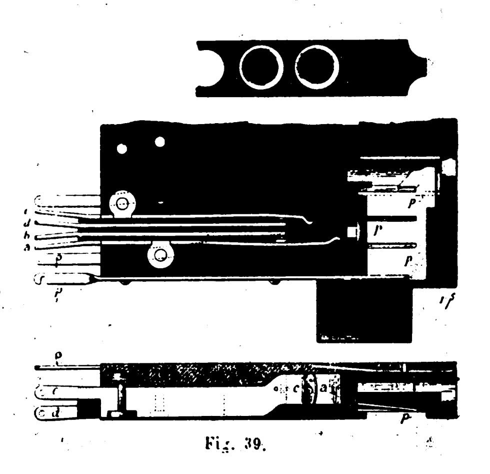
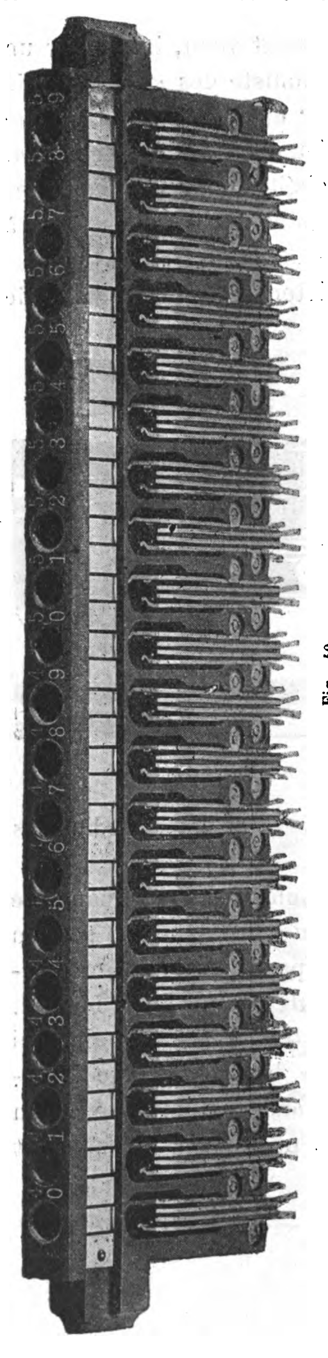


Fig. 39.

Quand la demande de communication émane de Paris, elle parvient au bureau soit par « une section de départ » de l'Hôtel, soit par « une section d'arrivée » si le demandeur appartient à un autre bureau. Dans les deux hypothèses, la téléphoniste urbaine qui en prend connaissance avise la téléphoniste interurbaine compétente : la demande est inscrite à son rang ; à partir de ce moment les opérations sont celles du cas précédent.


Fig. 40.

Bien entendu, quand la téléphoniste interurbaine voit qu'elle va pouvoir donner suite à une demande de communication, elle fait préparer quelques instants avant les connexions urbaines afin que, au moment où la ligne interurbaine devient libre, il n'y ait pas de temps perdu.

SERVICES ACCESSOIRES.

Le rez-de-chaussée joue jusqu'ici, en grande partie, comme nous l'avons dit, le rôle d'abri pour les voitures postales. On y a réservé cependant (*fig.* 41) les deux rotondes au service téléphonique. Dans la rotonde Sud-Est arrivent, sur un répartiteur spécial, les lignes interurbaines ; plusieurs sont utilisées par l'un des systèmes Cailho, Picard ou Van Rysselberghe pour la télégraphie et la

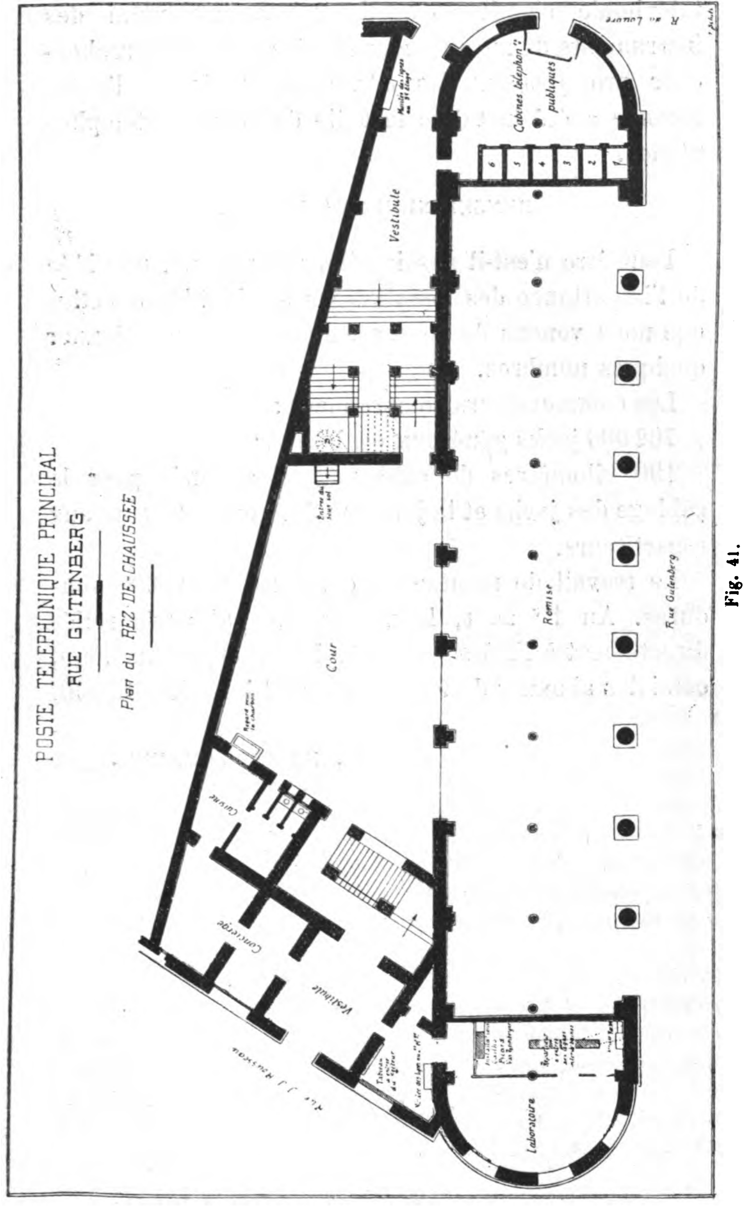

POSTE TELEPHONIQUE PRINCIPAL
RUE GUTENBERG
Plan du REZ-DE-CHAUSSEE
Cabines téléphon.s publiques
Vestibule
Cour
Remise
Rue Gutenberg
Cuisine
Concierge
Vestibule
Laboratoire
1
2
3
4
5
6

Fig. 41.

téléphonie simultanées. Un laboratoire muni des instruments de mesure convenables permet de rechercher promptement les dérangements. Dans l'autre rotonde a été installée la salle des cabines téléphoniques.

RENSEIGNEMENTS DIVERS.

Peut-être n'est-il pas inutile, pour donner une idée de l'importance des installations semblables à celles que nous venons de passer en revue, de mentionner quelques nombres.

Les commutateurs comprennent :

702 000 jacks généraux ou locaux ;

190 kilomètres de câbles à 20 abonnés pour le câblage des jacks et la jonction des commutateurs aux répartiteurs.

Le travail de montage a comporté 2 500 000 soudures. Au 1er août, le nombre des abonnés reliés directement à l'Hôtel des Téléphones dépassait 9600, celui des abonnés de Paris dépassant lui-même 18 000.

G. DE LA TOUANNE.

CHRONIQUE.

Sur les résonateurs et sur l'effluve de résonance.

Note de M. Oudin.

J'ai fait, en 1892, connaître le principe de l'élévation de tension des courants de haute fréquence par la résonance. Depuis lors mon premier appareil a subi plusieurs modifications et aujourd'hui il se présente sous la forme d'un solénoïde de fil de cuivre rouge non isolé, enroulé autour d'un cylindre de bois paraffiné.

Ce fil a $0^m,003$ de diamètre, sa longueur est de 60 mètres et l'écartement de ses spires de $0^m,01$. La haute fréquence est produite, soit par une machine à influence, soit par un quelconque des dispositifs de Hertz ou de Tesla. Mais l'appareil qui me donne le meilleur rendement est celui qu'a imaginé M. d'Arsonval et dans lequel l'étincelle oscillante éclate entre les armatures internes de deux bouteilles de Leyde. Ces condensateurs sont relativement de faible capacité (50 centimètres carrés de surfaces actives). Leurs armatures externes sont reliées au résonateur, l'une aboutissant à son extrémité inférieure, l'autre à une des spires voisine de cette extrémité, par l'intermédiaire d'un fil souple dont on fait varier le point d'attache au résonateur pour régler son ajustage.

On sépare ainsi le résonateur en deux solénoïdes qui se font suite l'un à l'autre. Dans le premier, plus court, prennent naissance les oscillations de haute fréquence, en même temps que sont fermés en court-circuit les courants de basse fréquence qui se produisent concurremment; dans le second, plus long, la haute fréquence agit seule et atteint par self-induction l'énorme tension que l'on constate dans cet

appareil, sans qu'il soit nécessaire, pour l'obtenir, de se servir, comme le conseille M. Tesla, de bobines induites isolées dans l'huile.

L'isolement du résonateur ne présente en effet aucun intérêt. Quand son réglage est bon, on voit de toute sa dernière spire, et rien que d'elle, jaillir des gerbes d'effluves qui ne ressemblent en rien à ceux de la machine statique. Au lieu d'une lueur continue, ils offrent l'aspect d'aigrettes violacées sinueuses, atteignant 12 ou 15 centimètres de longueur et couronnant la circonférence supérieure du résonateur d'une auréole lumineuse très brillante dans l'obscurité. Quelles que soient les dimensions du résonateur, c'est toujours de sa dernière spire seule, et des conducteurs qu'on y peut relier, que s'échappent ces aigrettes. La réaction des autres spires les unes sur les autres empêche cette projection d'effluves à l'air libre, à moins qu'on n'en approche une capacité quelconque, la main par exemple. De même, tant que l'ajustage n'est pas bon, on voit éclater entre les premières spires des étincelles bruyantes de relativement basse tension qui cessent de se produire quand le réglage est parfait. Il semble qu'alors toute l'énergie soit utilisée comme self-induction.

Le résonateur crée dans toute la pièce où il est placé un champ électrostatique alternatif très intense. De tous les objets métalliques on peut tirer des étincelles. Un tube de Gessler s'illumine à 2 mètres de lui quand deux observateurs s'en tiennent à égale distance; s'ils sont au même potentiel, rien ne se produit; mais, si l'un en est plus rapproché que l'autre, ils peuvent, en raison de l'amortissement rapide de ces oscillations, faire éclater entre leurs doigts des étincelles dont la longueur atteint 2 ou 3 millimètres et peut aller jusqu'à 10 ou 15 milimètres si l'on monte en résonateur une cage d'auto-conduction à l'intérieur de laquelle se tient un des observateurs. De même, si une personne présente sa main à l'effluve, on peut, de tous les points de son corps, au travers des vêtements les plus épais, tirer des étincelles produisant un picotement désagréable et qui, chose curieuse, deviennent bien moins nourries si la main, se rapprochant davantage du résonateur, en tire des étincelles au lieu d'effluves. C'est probablement pour la même cause que l'effluve provoque en certain points de la tête, quand il

rencontre des filets nerveux superficiels, une douleur assez vive qu'on ne peut reproduire en faisant éclater des étincelles sur le même point.

Cet effluve possède d'ailleurs une puissance de projection et de pénétration extrême que l'on peut démontrer de la façon suivante : on prend une lame diélectrique quelconque, verre ou ébonite, desséchée ou essuyée avec soin, et on la tient au moyen d'une pince isolante en bois. Si l'on en approche une pointe métallique reliée au résonateur et maintenue à 2 centimètres ou 3 centimètres de sa surface, on voit l'effluve qui jaillit de la pointe traverser la lame isolante et continuer son trajet dans l'air de l'autre côté, perpendiculairement au plan du diélectrique, comme s'il s'agissait d'une substance poreuse. On traverse ainsi des lames de verre ou d'ébonite de $2^{mm},5$ d'épaisseur, et cela sans qu'il y ait de l'autre côté le moindre corps pouvant agir comme capacité et transformer le diélectrique en condensateur. Si la lame de verre est représentée par un tube de Crookes, à l'intérieur duquel se trouve un écran fluorescent, on voit celui-ci se cribler de points lumineux, projections des lignes de l'effluve, en tenant la pointe métallique à $0^m,10$ de la surface de verre.

L'action prolongée de l'effluve de haute fréquence sur la peau produit des lésions analogues à celles des rayons X : épaississement, fendillement de l'épiderme, hyperkératose et troubles de circulation caractérisés par une apparence cyanique des extrémités. J'ai dit, d'autre part, les grands services qu'il pourrait rendre en thérapeutique dermatologique.

(*Comptes rendus*. Séance du 6 juin 1898.)

Variations avec la température de la force électromotrice des piles de Clark, forme en H (*).

La méthode employée pour étudier ces variations est celle du potentiomètre. Un courant constant, fourni par des

(*) *Philosophical Magazine*, 5e série, t. XLV, 1898.

piles Muirhead, mesuré par une balance centiampère de lord Kelvin (balance plusieurs fois comparée au voltamètre à argent), traverse un fil de manganèse, et son intensité est réglée de manière à ce que 1 centimètre de ce fil corresponde à $0^{\text{volt}},0001$. La pile à étudier était placée dans une enceinte à plusieurs enveloppes, munie d'un régulateur qui pouvait maintenir la température constante à 0,01. Pour opérer à différentes températures, on employait une circulation d'huile; quand la variation de température était de 1° en huit minutes, la différence maxima entre deux points du bain était $0^{\circ},2$; pour 1° en quinze minutes on n'observait pas de différence.

Les valeurs trouvées pour la force électromotrice à chaque température pendant l'échauffement sont un peu supérieures à celles trouvées pendant le refroidissement. Cette divergence, due au retard avec lequel la pile prend la température de l'enceinte, diminue avec la vitesse d'échauffement ou de refroidissement; elle est moindre avec la pile en H qu'avec le modèle B T. Cela tient sans doute à ce que le changement de température produit des variations de densité dans la solution de sulfate de zinc, et que l'amalgame de zinc étant au fond dans la forme en H est toujours en contact avec une solution saturée. La pile à cristaux du professeur Callendar et la pile Carhart sont aussi, pour de sérieuses variations de température, préférables à la forme B T. Mais avec la pile à cristaux de M. Callendar, sauf dans le type renversé, un peu de zinc peut tomber dans le mercure, et la pile Carhart présente de sérieux inconvénients : une erreur de quelques dixièmes de degré sur la température à laquelle les solutions sont saturées, entraîne une erreur de plusieurs dix millièmes de volt sur la force électromotrice, et, chaque fois qu'un courant passe à travers la pile, du zinc se dissout et la concentration augmente, fait qui a une importance particulière quand les piles sont employées avec des condensateurs.

M. DUFOUR.

Journal de Physique, août 1898.

Sur le « traînage » magnétique; par M. C. Fromme (*).

Ce mémoire renferme une étude détaillée de cas particuliers du phénomène de « traînage » ou « viscosité » magnétique, qui a déjà fait l'objet de travaux d'Ewing et de lord Rayleigh[*], et qu'on peut résumer ainsi : si on soumet une tige de fer à une force magnétisante croissant jusqu'à une certaine valeur à laquelle elle est ensuite maintenue, le moment magnétique de la tige croît encore pendant un certain temps à partir de l'instant où la force magnétisante est devenue constante; si celle-ci est, au contraire, décroissante, puis fixe, le moment décroît encore à partir de l'instant où elle est devenue fixe. L'auteur étudie seulement les phénomènes qui se produisent dans le cas où la force magnétisante, ayant d'abord été élevée à une certaine valeur maximum F, est ensuite, de différentes façons, à une valeur *f*, ou annulée.

Si la force magnétisante passe de F à O, le « traînage » du moment permanent ne dépend pas sensiblement du temps pendant lequel on a appliqué la force F; il décroît lorsqu'on augmente la rapidité avec laquelle F est ramenée à O; il croît avec la valeur du moment final, mais plus lentement que celle-ci.

Si la force magnétisante passe de F à O, puis à une valeur *f*, le traînage qui suit cette dernière opération est d'autant plus faible que la force magnétisante a été maintenue plus longtemps à O, et que l'opération a été répétée plus souvent.

Si la force magnétisante est réduite d'abord de F à *f*, maintenue un certain temps à cette valeur, puis réduite à O, le traînage dépend de la valeur de *f* et de la rapidité avec laquelle on a passé de F à *f*; il dépend aussi du traînage observé pendant le maintien de *f*.

Si le passage de F à O est effectué en maintenant la force un certain temps à chaque valeur intermédiaire, le traînage

(*) *Wiedemann's Annalen*, t. LXV, 1898, n° 5.

(**) Ewing, *Phil. Trains.*, 1885, 2e partie, p. 569. — Lond, *Proc. Roy Soc.*, t. XLVI, p. 269, 1890. — Lord Rayleig, *Phil. Mag.*, 5e série, t. XXII, p. 225, 1887. — Voir à ce sujet : Mascart et Joubert, *Leçons sur l'électr. et le magn.*, 2e édit., t. II, p. 706.

est beaucoup plus considérable que lorsque le passage est rapide.

En chauffant la tige et en la laissant refroidir à la température du laboratoire, on diminue le traînage observé après le passage de F à *f*; on obtient, en général, le même résultat en pliant la tige.

De petits chocs n'ont aucune influence, s'ils sont produits avant l'application de F; mais, s'ils sont produits entre F et *f*, ils diminuent le traînage.

Ch. Maurain.

Journal de Physique, 3e série, tome VII, septembre 1898.

Propriétés électromotrices d'amalgames de cadmium de diverses compositions; par M. W. Jaeger.

Dans la pile-étalon au cadmium de MM. Jaeger et Wachsmuth, le pôle est constitué par un amalgame de cadmium. M. Jaeger a recherché l'influence de la composition de cet amalgame sur la force électromotrice de l'élément.

La tension de l'amalgame de cadmium est indépendante de sa composition pour une teneur en cadmium comprise entre 5 et 15 p. 100; dans ces limites, la tension est, en outre, invariable avec le temps, à 1 p. 100 de millivolt près.

Pour les amalgames renfermant plus de 15 p. 100 de cadmium, la tension croît, au contraire, avec la teneur en cadmium, jusqu'au cadmium pur, et elle varie avec le temps pour chaque amalgame pris en particulier.

La tension du cadmium pur diffère d'environ 50 millivolts de celle de l'amalgame à 10 p. 100, tandis que, dans le cas du zinc, la tension ne présente pas de différence entre le métal pur et l'amalgame de cette concentration.

Si l'on considère enfin un barreau de cadmium amalgamé, immédiatement après l'amalgamation, sa tension est la même que celle d'un amalgame à 10 p. 100, ou n'en diffère que de quelques dixièmes de millivolt; mais elle varie ensuite très rapidement en se rapprochant de celle du cad-

(*) *Wiedemann's Annalen*, t. LXV, 1898. n° 5.

mium pur, probablement à cause de la diffusion du mercure dans l'intérieur du barreau, et elle atteint une valeur limite inférieure de 10 millivolts environ à la tension du cadmium pur.

Le cadmium amalgamé a donc une tension électrique mal définie et ne peut servir à l'établissement de l'étalon, tandis qu'on peut employer le zinc amalgamé pour l'étalon Clark. Il convient de prendre pour l'élément au cadmium un amalgame de teneur comprise entre 5 et 15 p. 100.

H. BAGARD.

(*Journal de Physique*, septembre 1898.)

Chemin de fer électrique de Zermatt au Gornergrat.

On a inauguré à la fin du mois d'août en Suisse le chemin de fer électrique, qui va de Zermatt au Gornergrat, à une hauteur de 3.020 mètres. C'est actuellement la ligne qui s'élève le plus haut. La durée du trajet de Zermatt au Gornergrat est d'une heure trente. La voie a 1 mètre de largeur et présente des pentes maxima de 20 p. 100 avec des rayons de courbe minimum de 80 mètres. Au milieu de la voie se trouve une crémaillère. La force motrice est obtenue par une chute d'eau de 200 mètres de hauteur, débitant environ 1.000 litres par seconde. Cette eau est fournie par une rivière alimentée par un glacier Findelen. Quatre turbines Girard de 250 chevaux commandent chacune directement à 400 tours par minute un alternateur à courants triphasés Brown Boveri et Cie. La tension est de 3×5.400 volts et la fréquence de 40 périodes par seconde. La canalisation part en câbles aériens de l'usine et se rend à des points placés à 2, 5 et 8 kilomètres de distance pour rejoindre des transformateurs. A la sortie des transformateurs, la tension des courants triphasés est de 3×540 volts. Des trolleys amènent le courant à la locomotive. Celle-ci d'un poids de 10,5 tonnes, est pourvue de deux moteurs de 90 chevaux. La vitesse moyenne est de 7 kilomètres à l'heure. Cette installation est intéressante en raison de la hauteur à laquelle elle se trouve et aussi parce qu'elle constitue la première application des

courants triphasés à la traction électrique à crémaillère dans une montagne.

(*La Nature*, 1er octobre 1898.)

Sur la variation des constantes diélectriques avec la température.

Note de MM. H. Pellat et P. Sacerdote.

Ces mesures de constantes diélectriques ont été effectuées avec l'appareil imaginé par l'un de nous (*) : la constante diélectrique K est donnée par la relation

$$K = \frac{c}{c - a},$$

c désignant l'épaisseur de la lame diélectrique en expérience, et a la différence des deux lectures faites à l'appareil selon qu'on y a introduit ou non la lame diélectrique ; les trois quantités K, c, a se rapportent à une même température. L'épaisseur c de la lame était mesurée au sphéromètre à une température quelconque et l'on déterminait ensuite sa valeur aux températures des différentes expériences au moyen des coefficients de dilatation. Pour les mesures de a, la principale difficulté était d'obtenir des températures uniformes et bien connues dans toute la masse de la lame diélectrique en expérience ; nous nous sommes placés dans de bonnes conditions sous ce rapport en n'opérant qu'à la température ambiante : cette température était rendue variable, soit en chauffant la salle où se trouvait l'appareil vingt-quatre heures avant la mesure ; soit, au contraire, en ouvrant les fenêtres toute la nuit précédente ; la température était mesurée avec un thermomètre au $\frac{1}{10}$ de degré dont le réservoir plongeait dans une lame diélectrique semblable à celle en expérience et placée comme elle, longtemps à l'avance, dans la cage de l'appareil de mesure.

Résultats pour la paraffine. — La lame de paraffine em-

(*) Pellat, *Comptes rendus*, t. CXX, p. 773. — *Journal de physique*, 3e série, t. IV, p. 501.

ployée avait une épaisseur de $8^{mm},51$ à $22^\circ,6$! voici quelques-unes des valeurs de K obtenues :

$t =$	$11^\circ,1$	22°	$33^\circ,3$ (*)
$K =$	2 287	2,278	2,259

La constante diélectrique de la paraffine diminue donc lorsque la température s'élève, et le coefficient moyen de diminution par degré est $3,6 \times 10^{-4}$ entre 11° et 22° et $5,6 \times 10^{-4}$ entre 11° et 33°.

Résultats pour l'ébonite. — La lame d'ébonite employée avait une épaisseur de $8^{mm},462$ à $18^\circ,1$.

Le coefficient de dilatation de l'ébonite, qui est nécessaire pour le calcul de l'épaisseur aux différentes températures, étant mal connu et pouvant du reste varier d'un échantillon à un autre, nous l'avons déterminé sur un échantillon d'ébonite pris dans le même bloc que la lame en expérience (**); ce coefficient a été trouvé égal à $8,7 \times 10^{-5}$ entre 10° et 20°.

Voici les valeurs de K obtenues :

$t =$	$10^\circ,2$	17°	$20^\circ,6$
$K =$	2,041	2,958	2,968

La constante diélectrique de l'ébonite augmente donc lorsque la température s'élève, et à peu près proportionnellement à l'élévation de température, le coefficient moyen de variation par degré étant $8,8 \times 10^{-4}$.

Application. — L'un de nous a montré ailleurs (***) que. dans la charge d'un condenseur à *température constante*, la

(*) Cette dernière mesure a été effectuée en chauffant la lame diélectrique seule dans une étuve, puis la portant rapidement dans l'appareil de mesure; au moyen de piles thermo-électriques filiformes convenablement immergées dans des lames de paraffine, on s'était assuré au préalable que, pendant le transport de la lame de l'étuve à l'appareil, sa température ne variait pas sensiblement et l'on s'était aussi renseigné sur le temps pendant lequel la lame devait séjourner dans l'étuve pour en prendre la température.

Pour l'ébonite, au contraire, le refroidissement était trop rapide pour permettre ce mode opératoire.

(**) Cette mesure a été faite par M. Sacerdote, au Bureau international des poids et mesures, par la méthode de M. Fizeau, l'appareil ayant été mis gracieusement à notre disposition par M. Benoît.

L'échantillon employé était un petit cube d'ébonite de 15 millim. d'arête et poli spéculairement sur une de ses faces.

(***) Pellat, *Journal de physique*, 3e série, t. VII, p. 18.

variation d'énergie est non pas $\frac{CV^2}{2}$, comme on l'admettait, mais $\frac{CV^2}{2}[1 + T(\lambda + \chi)]$, en désignant par T la température absolue du diélectrique, par λ son coefficient de dilatation linéaire et par χ le coefficient de variation de la constante diélectrique avec la température $\left(\frac{1}{K}\frac{dK}{dT}\right)$. Il résulte des recherches précédentes que, dans le cas d'un condensateur dont le diélectrique est l'ébonite pour $T = 273 + 27 = 300$, le terme $T(\lambda + \chi) = + 0{,}29$; donc :

L'énergie d'un tel condensateur chargé surpasse de plus d'un quart la valeur admise jusqu'à présent.

Si la charge ou la décharge a lieu rapidement, le phénomène, au lieu d'être isotherme, sera sensiblement adiabatique : pour un condensateur à ébonite la charge adiabatique amènera un refroidissement, par destruction d'une quantité d'énergie égale à $0{,}29 \frac{CV^2}{2}$, la décharge adiabatique amènera un échauffement correspondant à une création de chaleur $0{,}20 \frac{CV^2}{2}$.

Pour un condensateur formé d'une lame d'ébonite de 2 millimètres d'épaisseur métallisée sur ses deux faces et chargé à la différence de potentiel correspondant à 1 centimètre d'étincelle, le calcul montre que ces variations de température doivent être d'un peu moins d'un millième de degré; elles seraient donc encore très appréciables si l'ébonite était un diélectrique parfait. Mais, à cause du phénomène de résidu, la charge aussi bien que la décharge donnent lieu à un phénomène consécutif non réversible qui échauffe toujours le diélectrique d'une façon beaucoup plus intense que le phénomène réversible dont nous venons de nous occuper. C'est ce qui rend très difficile la mise en évidence de ce dernier phénomène.

(*Comptes rendus*, 17 octobre 1898.)

BIBLIOGRAPHIE

Télégraphie pratique. — *Traité complet de télégraphie électrique à l'usage des agents des postes et télégraphes et des chemins de fer, des constructeurs d'appareils télégraphiques,* etc.; par L. MONTILLOT, inspecteur des postes et télégraphes. — Veuve Ch. DUNOD, éditeur.

Le traité de M. Montillot est un livre essentiellement pratique et écrit pour guider ceux qui ont à faire usage des appareils télégraphiques. On n'y trouvera point de théorie générale : les formules y sont peu nombreuses et simples. Tous les appareils couramment en usage dans les bureaux télégraphiques de l'administration française ou de nos chemins de fer y sont décrits, mais ceux-là seulement : l'auteur a pris soin de dégager son livre de tout ce qui ne pouvait pas servir immédiatement à des praticiens.

La partie descriptive est largement développée. Les explications des appareils sont claires, détaillées et complétées par de nombreuses figures. Mais M. Montillot ne s'en est pas tenu aux seules descriptions : la partie réellement originale et utile de son ouvrage est celle qui a trait à l'usage pratique des objets décrits. Les télégraphistes y trouveront méthodiquement et clairement exposé tout ce qui concerne le montage et le démontage des appareils, leur entretien, leur réglage et leur manipulation. Ils y trouveront les mêmes renseignements sur les piles, les accumulateurs, les lignes. Enfin un dernier chapitre traite des dérangements de toute nature indiquant au lecteur quelles perturbations et quels

accidents peuvent affecter une installation télégraphique et, pour chaque cas particulier, quel remède corrigera le mal.

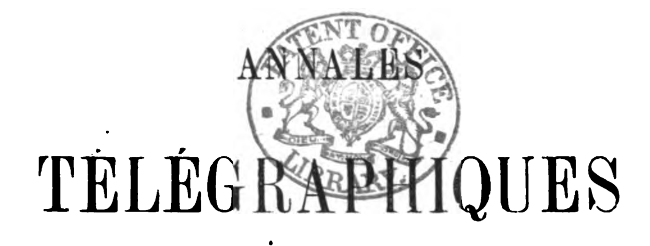
En résumé, le livre de M. Montillot atteint parfaitement le but que visait l'auteur : il sera pour tous les télégraphistes un excellent manuel rempli de renseignements et d'enseignements utiles.

F. DE NERVILLE.

4·4·99

L'Éditeur-Gérant : Vve CH. DUNOD.

39.441. — Imprimerie LAHURE, 9, rue de Fleurus, à Paris.



ANNALES TÉLÉGRAPHIQUES

Année 1898 **Novembre-Décembre**

NOUVEAU CABLE TÉLÉPHONIQUE

A ISOLEMENT D'AIR

(Système Willoughby Smith et Granville.)

La *Telegraph construction and maintenance Co* de Londres vient de construire et de poser, pour le compte du gouvernement britannique, un câble téléphonique d'un modèle tout nouveau entre l'Irlande et la Grande-Bretagne (système Willoughby Smith et Granville).

L'espace compris entre le fil d'aller et le fil de retour est en partie occupé par de l'air, afin de réduire, le plus possible, la capacité électrostatique de la ligne. Au contraire l'isolement par rapport à la terre est assuré par une épaisse couche de gutta-percha.

L'âme est à quatre conducteurs enroulés en hélice. Chaque conducteur se compose d'un gros fil central de cuivre entouré de dix fils plus petits. Le diamètre total est d'environ 3 millimètres. Cette cordelette est

recouverte d'une mince couche de gutta-percha de $0^{mm},7$ environ d'épaisseur.

Les quatre âmes élémentaires sont disposées aux sommets d'un carré, la distance d'axe en axe de deux fils voisins étant d'environ 4 millimètres, la distance de deux fils diamétralement opposés, d'environ 7 millimètres. L'espace compris à l'intérieur du carré entre les quatre âmes est libre et plein d'air. Une masse d'isolant enveloppe extérieurement le tout en un seul cylindre. Les poids de cuivre et de gutta par mille sont égaux et respectivement de 230 kilogrammes.

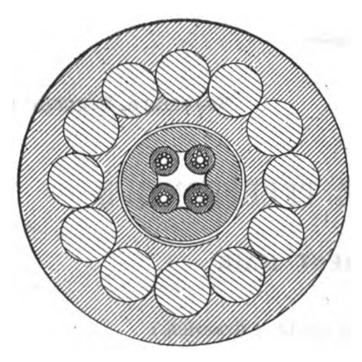


Fig. 1.

La chambre d'air, régnant entre les conducteurs, offre une section en forme de croix, dont les dimensions sont indiquées à la figure ci-contre. Le cylindre de gutta qui enveloppe l'ensemble des quatre conducteurs a un diamètre extérieur de 15 millimètres. Cette âme est entourée d'un ruban préservateur en laiton, d'un matelas de jute et d'une armature de 12 fils d'acier de 7 millimètres.

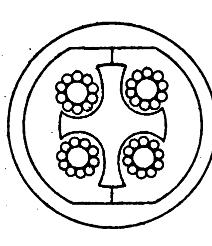


Fig. 2.

A chaque joint, les conducteurs sont, après la soudure du cuivre, noyés dans une masse d'isolant qui obture complètement le conduit central. Deux obturations successives sont distantes d'environ un mille.

La capacité électrostatique de ce câble, mesurée entre deux fils diamétralement opposés, est, paraît-il, de 0,1 microfarad par mille marin. La résistance électrique de chacun des conducteurs de cuivre est de $8^{\omega},6$ par mille ou de $17^{\omega},2$ pour l'ensemble des deux conducteurs. La résistance d'isolement de chaque conducteur par rapport à la terre est de 1.050 mégohms par mille.

Un câble de ce type peut être immergé, sans danger de déformation, jusqu'à des profondeurs pouvant atteindre 250 brasses (près de 500 mètres). L'introduction de l'air entre les conducteurs diminue la capacité dans des proportions telles que la communication téléphonique devient possible à des distances relativement grandes. L'isolement normal du conducteur est très suffisant et si un défaut vient à amener l'eau de la mer en un point de la chambre à air, les obturations qui coupent cette chambre à chaque joint limitent l'accident; la résistance d'isolement n'est pas sensiblement modifiée et la capacité n'est que très peu augmentée.

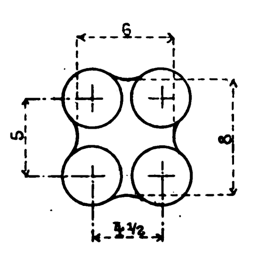


Fig. 3.

Pour la première fois, un câble de ce type a été posé en 1897 entre Beaulieu (Hampshire) et l'île de Wight. Il a une longueur de 3 milles environ. Un second câble du même type a été posé récemment entre l'Irlande et le pays de Galles. Sa longueur totale est de 60 milles. La profondeur maxima de la mer d'Irlande sur son parcours est de 40 brasses. Il assure, paraît-il, d'excellentes communications téléphoniques. Le gouvernement britannique aurait, dit-

on, l'intention d'immerger prochainement d'autres câbles du même système dans la mer du Nord, pour relier l'Angleterre à la Hollande et à l'Allemagne.

F.-G. DE NERVILLE.

LE COMMERCE DE LA GUTTA-PERCHA

SON AVENIR (*)

Monsieur le Ministre,

Parmi les nombreux articles de l'exportation de Singapore, la gutta-percha est de beaucoup le plus intéressant en raison de sa valeur, de sa production limitée, de ses applications industrielles, etc. Quand j'étais à Singapore, en 1881, j'entendais dire de tous côtés que la gutta-percha aurait disparu du marché courant avant quinze années, que les forêts qui la produisent auraient aussi disparu, par la saignée à mort de tous les arbres, les indigènes ne se préoccupant pas de replanter. Cette appréhension avait traversé les mers, et s'était manifestée au Congrès d'électricité tenu en Europe à la même époque. Je me rappelle, en octobre 1881, avoir vu débarquer M. l'Ingénieur des Télégraphes Seligmann-Lui et avoir préparé son voyage d'exploration de la côte Est de Sumatra. Je lui ai fourni un interprète malais avec lequel il a remonté la rivière de Syak jusqu'en plein pays Battak.

M. Seligmann-Lui a trouvé les arbres à gutta dans les immenses forêts de Sumatra. Il a rapporté avec lui des arbustes, en vue de leur acclimatation en Cochinchine.

(*) **Rapport adressé au Ministre des affaires étrangères par le Consul général de France à Singapore.**

Après avoir remis, en décembre 1881, le service du Consulat à M. Théodore Meyer, je suis allé moi-même dans le second grand centre de la production de la gutta-percha, à Bornéo, préoccupé de cette extinction prochaine, menaçante, d'un arbre précieux entre tous, la télégraphie sous-marine ne pouvant s'en passer. Mes appréhensions s'étaient dissipées en entendant les récits et les descriptions des Chinois, lesquels monopolisaient, à cette époque, dans la ville lacustre de Brunéi, la gomme du « Mayan Durian ».

Mais, à mon retour ici, en 1898, j'ai entendu exprimer les mêmes craintes de disparition, pour un avenir indéterminé, que par le passé. Toutefois, j'ai eu la consolation de constater que la gutta-percha existait encore sur le marché, bien que les quinze années fixées pour son existence fussent révolues. Les exportations étaient même restées au même chiffre. Je me suis immédiatement intéressé aux expériences qui se sont faites pendant ces années dernières, en vue d'extraire la gomme de gutta-percha, non plus par la saignée de l'arbre comme cela se pratique dans les forêts des Landes pour la résine, mais par le traitement des feuilles.

J'ai, en effet, trouvé toute une nouvelle industrie, toute une branche autrefois inconnue d'exportation, avec des ramifications à Sumatra, dans les archipels de Rhio et de Lingga (détroit de la Sonde), à Bornéo, Sarawak et Pontianak, dans la péninsule de Malacca, province Wellesley, Perak et Pahang; c'est l'exportation des feuilles d'arbres à gutta, principalement de celui connu en botanique sous le nom d'*Isanondra Hookerii*. Ces feuilles, à l'état sec, sont pressées en ballots d'environ 150 à 200 kilogrammes et expédiées,

par des agents spéciaux, en Belgique, dans une usine des environs de Bruxelles ; en France, à Orléans et à Asnières, peut-être ailleurs encore, je n'ai pu vérifier.

Une expédition vient d'être effectuée pour des expériences qui doivent se faire aux environs de Marseille. Les feuilles sèches se paient à Singapore de 3 à 5 dollars le picul de 60 kilogrammes (*). Ce sont des Français et des Belges qui font principalement, jusqu'à présent, ces exportations de Singapore et de Poulo Penang.

Est-ce à dire que la gutta-percha va, dans l'avenir, se manufacturer dans des usines européennes et que le produit récolté par les indigènes sera relégué au deuxième plan? La question est intéressante. J'en ai cherché la solution.

La gutta-percha est une gomme végétale d'une extrême sensibilité, sujette à des modifications, des altérations par suite de l'influence atmosphérique. L'oxydation, sous quelque forme que se présente la gutta, à l'état isolé ou à l'état latent dans les feuilles, s'effectue rapidement au contact de l'air. Par suite, ses qualités de durabilité, de solidité vont s'atténuant et elle devient, à moins d'être conservée sous l'eau, impropre au principal usage qu'en fait l'industrie : le revêtement des fils de télégraphie et de téléphonie.

Les feuilles sèches n'échappent pas à l'influence atmosphérique et subissent aussi le phénomène d'oxydation. La gomme qui en est tirée est d'une qualité impropre à la fabrication des câbles sous-marins. De plus, les usines d'Europe traitent ces feuilles sèches, où la gutta se trouve déjà oxydée, par des procédés

(*) Il faut trois piculs de feuilles fraîches pour en faire un de feuilles sèches.

chimiques, sulfure de carbone et autres, lesquels amènent tous, à des degrés divers, une désagrégation moléculaire. De telle sorte que le produit obtenu n'est plus la gutta proprement dite, celle des câbles, mais une substance se rapprochant de la gomme India Rubber ou Bornéo Rubber. Cette gomme est encore utilisable dans l'industrie, les applications de la gutta-percha étant multiples. Elle a une valeur marchande, je crois, encore suffisante pour déterminer le maintien du trafic de feuilles sèches.

En effet, vingt piculs de feuilles sèches (un peu plus d'une tonne) doivent donner un picul de gutta-percha chimiquement produite. Coût des feuilles : 100 dollars, fret 15 dollars, manipulations 50 dollars. J'arrive à une dépense de 165 dollars pour produire un article qui peut valoir de $ 250 à $ 280. Il y aurait, si mes évaluations sont exactes, une marge de profit.

Mais n'est-il point possible d'obtenir, par le traitement des feuilles, la gutta-percha de première qualité, celle de l'industrie des câbles?

C'est cette grosse question qui a été mise à l'étude à Singapore, depuis 1863, qui a donné lieu à des expériences, à des tâtonnements, à des missions du Gouvernement français, à des formations de compagnies mais finalement à des déceptions, à des insuccès.

Il faut, en effet, traiter la feuille à l'état frais, non pas à l'état sec, et il faut la traiter autrement que par des réactifs chimiques afin de parer aux deux grands obstacles signalés plus haut, l'oxydation et la désagrégation moléculaire.

Enfin, tout récemment, le problème vient d'être résolu, et c'est à un Français, à un docteur ès-ciences de la Faculté de Paris, ancien préparateur de physique

à la Sorbonne, que revient l'honneur de la solution; solution non point théorique, mais pratique et commercialement réalisable.

J'ai demandé et obtenu de visiter son usine, fermée à tout le monde. J'ai assisté à la fabrication de la gutta-percha avec des feuilles fraîches. Je suis donc en mesure de porter témoignage de la sincérité de M. Ledeboer.

L'invention de notre compatriote a reçu une sorte de consécration par le contrat que la grande compagnie anglaise « Eastern Extension » a passé avec lui. La signature du directeur n'est pas donnée à la légère.

Une compagnie hollandaise vient de se former pour l'exploitation du procédé dans les îles de la Sonde.

Mais il y a place pour d'autres entreprises, car toute la région productrice de l'Isonandra Hookerii n'est pas encore accaparée et monopolisée. Il y aurait place notamment pour quelque grande entreprise française, soit dans la péninsule de Malacca, soit dans l'île de Bornéo.

Il va sans dire que la feuille cueillie fraîche qui sécherait ou s'oxyderait en route, doit être travaillée sur place. L'usine doit être dans le voisinage, aussi immédiat que possible, de la forêt ou de la plantation.

J'ai dit « plantation », car désormais l'arbre à gutta-percha peut être l'objet d'une culture rationnelle et donner un rendement en feuilles dès la cinquième année. Tandis que la gomme obtenue par saignée n'est fournie que par des arbres de cinquante à soixante-quinze ans, toujours saignés à mort par les indigènes.

Si quelque syndicat français voulait tenter l'expérience, il faudrait tout d'abord envoyer une mission

d'études pour préparer les voies à la constitution d'une compagnie, en vue du choix et de l'acquisition des terrains, de la création des usines, etc., etc. Mais, dès à présent, je suis en mesure de fournir quelques données préliminaires.

L'installation d'usine coûterait environ $ 30 000 ou 75 000 francs. Un bon élève des Arts et Métiers pourrait conduire l'affaire avec une main-d'œuvre indigène facile à recruter et à former. Pas n'est besoin d'un ingénieur, un mécanicien suffit.

L'usine pourrait être installée dans la péninsule de Malacca, où l'on obtiendrait facilement une concession de forêts et des terres défrichées pour plantation. Elle serait à proximité d'un chemin de fer ou d'un cours d'eau navigable. La compagnie devrait posséder un petit steamer pour le transport des feuilles et autres opérations. Il ferait ses frais très facilement.

Pendant les cinq premières années, en attendant les résultats de la plantation, on obtiendrait les feuilles par contrats avec les indigènes malais qui feraient la cueillette dans la forêt vierge.

Le picul de feuilles vertes se paie $ 1 (2 fr. 50). Il faut 60 piculs de feuilles fraîches pour faire un picul de gutta-percha, qualité Ledeboer, meilleure que le straits n° 1 et d'une valeur d'au moins $ 350 ou 885 francs.

L'usine pourrait travailler annuellement 30 000 piculs de feuilles, dépouille de 300 000 arbres adultes, pour arriver à une production de 500 tonnes de gutta-percha d'une valeur totale de 442 000 francs; les frais n'atteindraient pas 200 000 francs.

La plantation qui reviendrait à une centaine de mille francs pour une étendue de 500 hectares, devrait

contenir 200 à 300 000 arbres. Après cinq années, un rendement important en feuilles fournirait un appoint à l'alimentation de l'usine et, après dix années, celle-ci serait à l'abri de toute grève et de toute prétention des indigènes. En effet, les arbres de cet âge fourniraient l'approvisionnement nécessaire de 30 000 piculs de feuilles.

On peut planter 1 000 arbres par hectare. Mais il y a un déchet inévitable. C'est pourquoi je conseillerais une étendue de 500 hectares. D'autres cultures pourraient être faites simultanément et augmenter les profits de l'entreprise.

Il est presque impossible de se procurer des graines d'Isonandra. Mais on trouverait facilement par contrat avec des indigènes 500 000 jeunes pousses dans la forêt vierge, à un prix abordable.

Il va sans dire que l'entreprise ne pourrait se faire qu'après entente avec l'autorité locale, laquelle favoriserait certainement une industrie qui serait pour la contrée une source de richesse considérable.

Les voies seront d'ailleurs prochainement préparées dans ce sens.

L'affaire pourrait se tenter également dans l'île de Bornéo, partie anglaise, à Brunei et à Sarawak. Je crois qu'il n'y a rien à faire dans les Indes néerlandaises, une puissante compagnie étant en formation à Rotterdam, laquelle ne manquera pas de stipuler un monopole à son profit, tant pour le Bornéo hollandais que pour Sumatra.

Mais il y a place pour tout le monde. En effet, il faudra bien du temps pour installer 50 usines travaillant 30 000 piculs de feuilles chacune, soit 1 500 000 piculs pour une production totale de

25 000 piculs de gutta-percha. Or l'exportation annuelle est de près de 50 000 piculs. Il est à prévoir que, dès qu'un certain nombre d'usines seront en opération, la coupe et la saignée à mort des arbres sera interdite par les législations et règlements locaux. Par suite, les prix se maintiendront ou même seront en hausse.

Votre Excellence appréciera si tous ces renseignements qui sont le résultat de mes investigations personnelles et de mes conversations avec des personnes compétentes méritent d'être communiqués aux compagnies françaises de télégraphie sous-marine et au commerce français de la gutta-percha.

J'ai déjà reçu plusieurs demandes de renseignements de la part de fabricants, d'industriels français. Je ne puis leur répondre complètement par lettre individuelle. Je me bornerai à leur répondre que toutes les informations en mon pouvoir ont été adressées à votre Département pour être transmises au Sous-secrétariat des Postes et des Télégraphes et au Ministère de l'Industrie et du Commerce.

J'ai été consulté aussi sur la question de l'acclimatation de l'Isonandra dans des colonies françaises. Ce serait très simple et très facile si l'on pouvait se procurer des graines et les transporter. Mais ce n'est pas le cas. Les graines sont presque introuvables. J'ai écrit à Sarawak pour en avoir et je ne compte pas beaucoup sur une réponse favorable bien que j'aie promis un prix élevé.

De plus, les graines ne conservent leur faculté germinatrice qu'au prix de soins méticuleux. On arrive avec peine à les faire germer à Ceylan, après seulement cinq jours de mer. Les essais faits dans l'Inde

anglaise n'ont pas donné de résultats satisfaisants.

Le seul moyen sera d'affréter un bâtiment spécialement aménagé en pépinière flottante. Mais cela ne sera réalisable que par une compagnie organisée, dont les ingénieurs auront étudié les conditions de vitalité de l'Isonandra et auront à leur disposition de jeunes arbres en nombre suffisant transportables et susceptibles d'être acclimatés dans des terrains savamment préparés à les recevoir.

Je suis, etc.

DE JOUFFROY D'ABBANS.



LA CHAÎNETTE

FORMULES ET TABLES NUMÉRIQUES

APPLICATIONS AUX LIGNES AÉRIENNES

OU SOUS-MARINES

La chaînette est la forme d'équilibre d'un fil homogène pesant. C'est la forme prise par les fils télégraphiques entre les poteaux qui les supportent, par un câble qu'on relève du fond de la mer, par la ligne de drague traînée par un navire d'un mouvement uniforme, en supposant que la résistance opposée par l'eau au déplacement du filin de drague soit négligeable. Si l'on applique une force électromotrice constante à une ligne électrique d'un isolement uniforme, cette ligne étant, à son extrémité, soit isolée, soit à la terre, certains éléments d'une chaînette convenable représentent, comme nous le verrons, la distribution dans le régime permanent soit du potentiel, soit du courant.

Nous donnons dans cet article des formules et des tables numériques qui pourront servir à résoudre pratiquement les problèmes usuels que l'on rencontre dans la pose des lignes aériennes, le relèvement et le dragage des câbles sous-marins et l'étude du régime permanent d'une ligne électrique, isolée imparfaitement mais uniformément, et à laquelle est appliquée une force électromotrice constante.

LA CHAINETTE

§ 1. Formules (*).

Considérons une chaînette, position d'équilibre d'un fil homogène pesant, tendu entre deux points. Prenons comme origine O, le point où la tangente à la chaînette est horizontale, pour axe des x cette horizontale, pour axe des y la verticale.

Soient p le poids par unité de longueur du fil, t la tension au point O.

Appelons ch$u$, sh$u$, th$u$ les cosinus, sinus et tangente hyperboliques de u :

$$\text{ch}\, u = \frac{e^u + e^{-u}}{2}.$$

$$\text{sh}\, u = \frac{e^u - e^{-u}}{2}.$$

$$\text{th}\, u = \frac{\text{sh}\, u}{\text{ch}\, u}.$$

Si nous posons

$$u = \frac{px}{t},$$

nous aurons

$$1 + \frac{p}{t} y = \text{ch}\, u.$$

Ainsi, si on prend comme paramètre u le rapport du poids d'une longueur de fil égale à l'abscisse, à la tension au point le plus bas, ch$u$ est le rapport de la tension $t + py$ au point correspondant à u, à la tension t au point le plus bas. Ces deux formules

(*) Cf. *Éclairage électrique*, 21 mai 1898, où nous avons publié les formules et les tables numériques du présent article avec l'indication des applications.

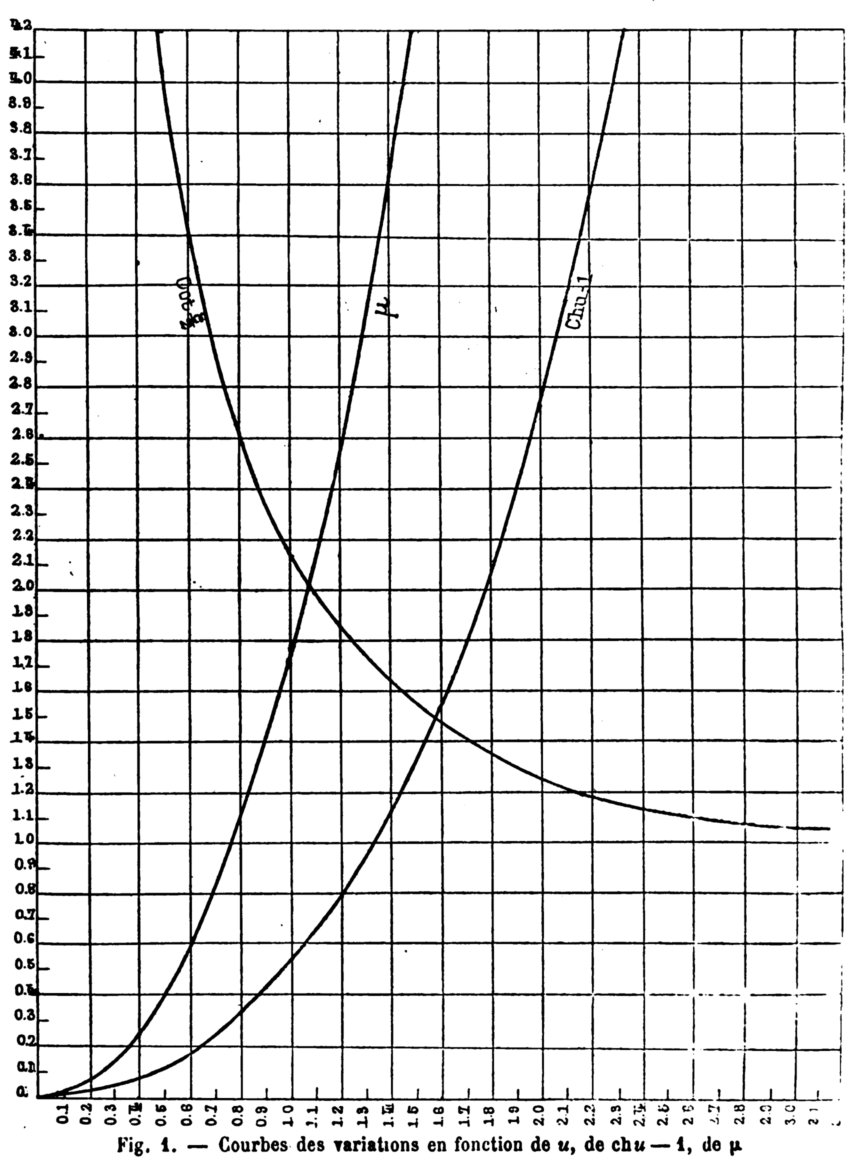


Fig. 1. — Courbes des variations en fonction de u, de ch$u$ — 1, de μ exprimé en dixièmes, et de cot $\frac{\varphi}{2}$.

exprime les coordonnées (x, y) d'un point M de la chaînette en fonction du paramètre u.

Soit φ l'angle avec l'horizontale de la tangente MT à la chaînette au point M, de paramètre u; on a :

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}\varphi = \operatorname{sh} u = \frac{ps}{t},$$

s désignant la longueur de courbe OM.

Le mou μ, correspondant à l'arc $OM = s$, sera la fraction de l'abscisse x du point M, qu'il faudra ajouter à cette abscisse, pour avoir la longueur de l'arc OM :

$$1 + \mu = \frac{s}{x}.$$

La touée τ, correspondant à l'arc $OM = s$, sera la fraction de l'ordonnée y du point M, qu'il faudra ajouter à cette ordonnée, pour avoir la longueur de l'arc OM :

$$1 + \tau = \frac{s}{y}.$$

Nous aurons les formules suivantes :

(1) $$\frac{px}{t} = u = \log \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right);$$

(2) $$\frac{t + py}{t} = \operatorname{ch} u = \operatorname{séc} \varphi;$$

(3) $$\frac{ps}{t} = \operatorname{sh} u = \operatorname{tg} \varphi;$$

(4) $$1 + \mu = \frac{s}{x} = \frac{\operatorname{sh} u}{u} = \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\log \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)};$$

(5) $$\frac{t + py}{px} = \frac{\operatorname{ch} u}{u} = \frac{\operatorname{séc}\varphi}{\log \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)};$$

(6) $$1 + \tau = \frac{s}{y} = \frac{1 + \operatorname{ch} u}{\operatorname{sh} u} = \cot \frac{\varphi}{2};$$

(7) $$\frac{y}{x} = \frac{\operatorname{ch} u - 1}{u} = \frac{\operatorname{séc}\varphi - 1}{\log \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)};$$

(8) $$\frac{ps}{t + py} = \operatorname{th} u = \sin\varphi;$$

(9) $$\frac{t}{py} = \frac{1}{\operatorname{ch} u - 1} = \frac{1}{2}\left(\cot^2\frac{\varphi}{2} - 1\right);$$

(10) $$\frac{t + py}{py} = \frac{\operatorname{ch} u}{\operatorname{ch} u - 1} = \frac{1}{2}\left(\cot^2\frac{\varphi}{2} + 1\right).$$

Houël a publié des tables donnant pour des valeurs de l'amplitude hyperbolique φ de millième en millième du quadrant, les valeurs de l'argument u et des fonctions $\operatorname{ch} u$, $\operatorname{sh} u$, $\operatorname{th} u$ et de leurs inverses.

Nous avons adopté les notations de Houël et nous avons dressé les tables $\frac{\operatorname{sh} u}{u}$, $\frac{\operatorname{ch} u - 1}{u}$, $\frac{\operatorname{ch} u}{u}$, pour des valeurs de l'amplitude φ variant de centième en centième du quadrant.

Nous donnons ces tables en y ajoutant les tables de u, de $\operatorname{ch} u$, de $\operatorname{sh} u$ et de $\cot\frac{\varphi}{2}$.

La connaissance de deux quelconques des forces : px, py, ps, t, $t + py$, permet de déterminer, par un simple rapport, un nombre sans dimensions qu'on cherchera dans celle des colonnes qui lui correspond, le calcul des autres quantités se fera immédiatement avec les nombres lus sur la ligne horizontale correspondante.

Il y a 10 combinaisons possibles des 5 quantités ci-dessus prises 2 à 2.

Les 3 combinaisons t, py; $t + py, py$; $t, t + py$ se réduisent à une seule.

On sait donc résoudre immédiatement 8 problèmes sur la chaînette.

Au point de vue graphique, se donner deux quelconques des cinq grandeurs considérées revient à se donner l'ordonnée d'une courbe qu'on peut construire en portant u en abscisse et en ordonnées les valeurs lues, en regard de u, dans les tables.

Soit u une abscisse correspondant à l'ordonnée connue; les ordonnées des autres courbes, correspondant à u, détermineront, par de simples rapports, les inconnues :

Une seule de ces courbes a une tangente parallèle à l'axe des abscisses, c'est la courbe $\frac{\text{ch}\, u}{u} = \frac{t + py}{px}$, donc il y aura deux solutions dans le cas où les deux données seront px, et $t + py$; la solution sera unique dans tous les autres cas. Si l'on veut résoudre graphiquement les problèmes, il sera convenable d'amplifier les ordonnées de la courbe $\frac{\text{sh}\, u}{u} - 1 = \mu$.

Sur la figure 1 sont indiquées les courbes représentant, en fonction de u porté en abscisse, les quantités $\text{ch}\, u - 1$, $\cot \frac{\varphi}{2}$ et μ.

Les ordonnées de la courbe des μ ont été amplifiées dans le rapport de 1 à 10.

§ 2. Remarques géométriques.

Considérons la courbe $\text{ch}\, u - 1$ de la figure 1, cette courbe est une chaînette et une chaînette quelconque dont le sommet sera placé en O, la tangente au sommet coïncidant avec Ou, sera l'homothétique par rapport à O de la chaînette $\text{ch}\, u - 1$.

La courbe $\text{ch}\, u - 1$ représente donc, à une certaine échelle, la forme d'équilibre d'un fil homogène pesant quelconque.

Portons sur l'axe des ordonnées négatives à partir de O une longueur $OO_1 = 1$ et menons $O_1 u_1$ parallèle à Ou (*fig.* 2).

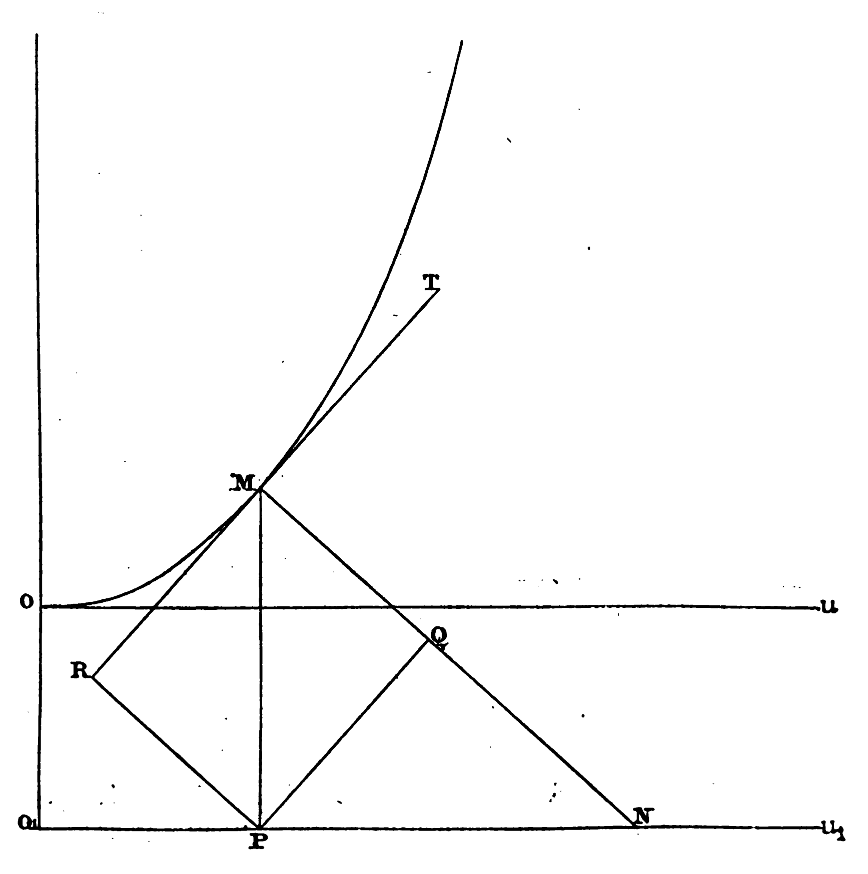


Fig. 2.

Tables numériques.

u	φ	Ch u	Sh u	$\frac{\text{Sh}\,u}{u}$	$\frac{\text{Ch}\,u}{u}$	$\frac{\text{Ch}\,u-1}{u}$	Cot $\frac{\varphi}{2}$	Th u
0,0157	0°,54′	1,0001	0,0157	»	63,7	»	127,321	0,0157
0,0314	1°,48′	1,0005	0,0314	»	31,9	»	63,657	0,0314
0,0471	2°,42′	1,0011	0,0472	»	21,3	»	42,433	0,0471
0,0629	3°,36′	1,0020	0,0629	»	15,9	»	31,821	0,0628
0,0786	4°,30′	1,0031	0,0787	»	12,8	»	25,452	0,0785
0,0944	5°,24′	1,0045	0,0945	1,001	10,6	0,048	21,205	0,0941
0,1102	6°,18′	1,0061	0,1104	1,002	9,12	0,055	18,171	0,1097
0,1260	7°,12′	1,0079	0,1263	1,003	8	0,063	15,895	0,1253
0,1418	8°,6′	1,0101	0,1423	1,004	7,12	0,071	14,124	0,1409
0,1577	9°	1,0125	0,1584	1,005	6,42	0,079	12,706	0,1564
0,1737	9°,54′	1,0151	0,1745	1,005	5,84	0,087	11,546	0,1719
0,1896	10°,48′	1,0180	0,1908	1,006	5,37	0,095	10,579	0,1874
0,2056	11°,42′	1,0212	0,2071	1,007	4,97	0,103	9,760	0,2028
0,2217	12°,36′	1,0247	0,2235	1,008	4,62	0,111	9,058	0,2181
0,2378	13°,30′	1,0284	0,2401	1,009	4,32	0,119	8,449	0,2334
0,2540	14°,24′	1,0324	0,2568	1,011	4,06	0,127	7,916	0,2487
0,2703	15°,18′	1,0367	0,2736	1,012	3,84	0,135	7,445	0,2639
0,2866	16°.12′	1,0413	0,2905	1,014	3,63	0,144	7,026	0,2790
0,3030	17°,6′	1,0463	0,3076	1,015	3,45	0,153	6,651	0,2940
0,3195	18°	1,0515	0,3249	1,017	3,29	0,161	6,314	0,3090
0,3360	18°,54′	1,0570	0,3424	1,019	3,15	0,169	6,008	0,3239
0,3527	19°,48′	1,0628	0,3600	1,021	3,01	0,178	5,730	0,3387
0,3694	20°,42′	1,0690	0,3779	1,023	2,89	0,187	5,475	0,3535
0,3863	21°,36′	1,0755	0,3959	1,025	2,78	0,195	5,242	0,3681
0,4032	22°,30′	1,0824	0,4142	1,027	2,68	0,204	5,027	0,3827
0,4203	23°,24′	1,0896	0,4327	1,029	2,59	0,213	4,829	0,3971
0,4374	24°.18′	1,0972	0,4515	1,032	2,51	0,222	4,645	0,4115
0,4547	25°,12′	1,1052	0,4706	1,035	2,43	0,231	4,474	0,4258
0,4722	26°,6′	1,1136	0,4899	1,038	2,36	0,240	4,314	0,4399
0,4897	27°	1,1223	0,5095	1,041	2,29	0,250	4,165	0,4540
0,5074	27°,54′	1,1315	0,5295	1,044	2,23	0,259	4,026	0,4679
0,5253	28°,48′	1.1412	0,5498	1,047	2,17	0,269	3,895	0,4818
0,5433	29°,42′	1,1512	0,5704	1,050	2,118	0,278	3,772	0,4955
0,5614	30°,36′	1,1618	0,5914	1,053	2,068	0,288	3,655	0,5090
0,5791	31°,30′	1,1728	0,6128	1,057	2,022	0,298	3,546	0,5225
0,5983	32°,24′	1,1844	0,6346	1,061	1,979	0,308	3,442	0,5358
0,6170	33°,18′	1,1964	0,6569	1,065	1,939	0,318	3,344	0,5490
0,6359	34°,12′	1,2091	0,6796	1,069	1,902	0,329	3,251	0,5621
0,6550	35°,6′	1,2223	0,7028	1,073	1,867	0,339	3,162	0,5750
0,6743	36°	1,2361	0,7265	1,077	1,834	0,350	3,078	0,5878
0,6938	36°,54′	1,2505	0,7508	1,082	1,805	0,361	2,997	0,6004
0,7136	37°,48′	1,2656	0,7757	1,087	1,776	0,372	2,921	0,6129
0,7336	38°,42′	1,2813	0,8012	1,092	1,749	0,383	2,848	0,6252
0,7538	39°,36′	1,2978	0,8273	1,097	1,724	0,395	2,778	0,6374
0,7743	40°,30′	1,3151	0,8541	1,103	1,701	0,407	2,711	0,6494
0,7951	41°,24′	1,3331	0,8816	1,109	1,679	0,419	2,646	0,6613
0,8162	42°,18′	1,3520	0,9099	1,115	1,659	0,431	2,585	0,6730
0,8376	43°,12′	1,3718	0,9391	1,121	1,640	0,444	2,526	0,6845
0,8593	44°,6′	1,3925	0,9691	1,128	1,622	0,457	2,469	0,6959
0,8814	45°	1,4142	1	1,135	1,605	0,470	2,414	0,7071

u	φ	Ch u	Sh u	$\frac{\text{Sh}\,u}{u}$	$\frac{\text{Ch}\,u}{u}$	$\frac{\text{Ch}\,u-1}{u}$	Cot $\frac{\varphi}{2}$
0,8814	45°	1,4142	1	1,135	1,605	0,470	2,414
0,9038	45°,54′	1,4370	1,0319	1,142	1,590	0,483	2,362
0,9265	46°,48′	1,4608	1,0649	1,149	1,577	0,497	2,311
0,9497	47°,42′	1,4859	1,0990	1,157	1,565	0,512	2,262
0,9732	48°,36′	1,5121	1,1343	1,165	1,554	0,526	2,215
0,9972	49°,30′	1,5398	1,1708	1,174	1,544	0,541	2,169
1,0216	50°,24′	1,5688	1,2088	1,183	1,536	0,557	2,125
1,0465	51°,18′	1,5994	1,2482	1,193	1,529	0,573	2,082
1,0718	52°,12′	1,6316	1,2892	1,203	1,523	0,589	2,041
1,0977	53°,6′	1,6655	1,3319	1,213	1,517	0,606	2,001
1,1242	54°	1,7013	1,3764	1,224	1,514	0,624	1,963
1,1512	54°,54′	1,7391	1,4229	1,237	1,511	0,642	1,925
1,1788	55°,48′	1,7791	1,4715	1,248	1,509	0,661	1,889
1.2071	56°,42′	1,8214	1,5224	1,261	1,509	0,680	1,853
1,2361	57°,36′	1,8663	1,5757	1,275	1,510	0,701	1,819
1,2657	58°,30′	1,9139	1,6319	1,289	1,512	0,722	1,786
1,2962	59°,24′	1,9645	1,6909	1,304	1,515	0,744	1,753
1,3275	60°,18′	2,0183	1,7532	1,321	1,520	0,767	1,722
1,3596	61°,12′	2,0757	1,8190	1,338	1,527	0,791	1,691
1,3927	62°,6′	2,1371	1,8887	1,356	1,535	0,816	1.661
1,4268	63°	2,2027	1,9626	1,376	1,544	0,843	1,632
1,4619	63°,54′	2,2730	1,0413	1,396	1,555	0,871	1,603
1,4982	64°,48′	2,3486	2,1251	1,418	1,568	0,900	1,576
1,5357	65°,42′	2,4300	2,2148	1,44	1,583	0,931	1,549
1,5746	66°,36′	2,5180	2,3109	1,47	1,600	0,964	1,522
1,6149	67°,30′	2,6131	2,4142	1,50	1,619	0,999	1,497
1,6567	68°,24′	2,7165	2,5257	1,53	1,640	1,036	1,471
1,7003	69°,18′	2,8291	2,6464	1,56	1,663	1,076	1,447
1,7457	70°,12′	2,9521	2,7776	1,59	1,689	1,118	1,423
1,7931	71°,6′	3,0872	2,9208	1,63	1,719	1,164	1,399
1,8427	72°	3,2361	3,0777	1,67	1,753	1,214	1,376
1,8948	72°,54′	3,401	3,251	1,72	1,792	1,267	1,354
1,9497	73°,48′	3,584	3,442	1,77	1,836	1,325	1,332
2,0076	74°,42′	3,790	3,655	1,82	1,886	1,39	1,310
2,0689	75°,36′	4,021	3,895	1,88	1,943	1,46	1,289
2,1340	76°,30′	4,284	4,165	1,95	2,008	1,54	1,268
2,2036	77°,24′	4,584	4,474	2,03	2,082	1,63	1.248
2,2783	78°,18′	4,931	4,829	2,12	2,166	1,73	1,228
2,3589	79°,12′	5,337	5,242	2,22	2,263	1,84	1,209
2,4463	80°,6′	5,816	5,730	2,34	2,377	1,97	1,190
2,5421	81°	6,392	6,314	2,48	2,51	2,12	1,171
2,6478	81°,54′	7,097	7,026	2,65	2,68	2,30	1,152
2,7660	82°,48′	7,979	7,916	2.86	2,88	2,52	1,134
2,8998	83°,42′	9,113	9,058	3,12	3,14	2,80	1,116
3,0542	84°,36′	10,626	10,579	3,46	3,48	3,15	1,099
3,2368	85°,30′	12,745	12,706	3,92	3,94	3,63	1,082
3,460	86°,24′	15,93	15,89	4,59	4,60	4,31	1,065
3,748	87°,18′	21,23	21,20	5,66	5,66	5,40	1,048
4,154	88°,12′	31,84	31,82	7,66	7,66	7,42	1,032
4,847	89°,6′	63,66	63,66	13,13	13,13	12,93	1,016
∞	90°	∞	∞	∞	∞	∞	1

Soient :

M un point quelconque de la chaînette,

P la projection de M sur $O_1 u_1$,

MT la tangente en M,

MN la normale extérieure, N étant l'intersection avec $O_1 u_1$,

Q et R les projections de P sur la normale et la tangente.

La chaînette considérée jouit des propriétés suivantes :

1° $MQ = OO_1 = 1$, $MP = \frac{1}{\cos\varphi}$.

2° $MN = \frac{1}{\cos^2\varphi}$ est égal au rayon de courbure ρ en M.

3° $MR = \text{sh}\, u = \text{arc}\, OM$, c'est-à-dire que R est un point de la développante.

4° M est le lieu décrit par le foyer d'une parabole, dont la distance du foyer au sommet, c.-à-d. le demi-paramètre est l'unité, cette parabole roulant sur la droite $O_1 u_1$.

Si donc on n'a à sa disposition ni les courbes ni les tables, on peut néanmoins résoudre graphiquement les problèmes que nous traitons, en employant, pour la construction des courbes, la méthode expéditive suivante :

Décrire une parabole dont le demi-paramètre sera l'unité de longueur choisie, il suffit pour cela d'une règle droite et d'une équerre, la découper et la faire rouler sur $O_1 u_1$, le foyer et le sommet coïncidant au départ respectivement avec O et O_1. Le foyer de la parabole décrira la chaînette qu'on pourra ainsi tracer d'un trait continu.

Les autres courbes se construiront facilement, en se servant des propriétés indiquées ci-dessus. On pourra ainsi les tracer d'une façon suffisamment exacte pour les besoins de la pratique.

APPLICATIONS.

§ 1. Lignes aériennes.

Nous supposons dans ce qui suit que les points d'appui sont à la même hauteur.

1. *Quelle tension et quelle portée* 2x *faut-il adopter pour avoir une longueur* 2s *avec une flèche donnée* y*?*

On a

$$\cot \frac{\varphi}{2} = \frac{s}{y}.$$

La tension au point le plus bas est donnée par (9); la tension au point le plus haut par (10); x sera donné, à l'aide des tables, soit par (1), soit par (4), soit par (7).

2. *On se donne la flèche* y *et la tension* t, *quelles sont la portée et la longueur correspondantes?*

$\text{ch}\, u$ est donné par l'équation (2); x et s se calculeront à l'aide des tables par (1) et par (6).

3. *Quelle tension et quelle longueur faut-il donner au fil pour avoir une flèche déterminée* y *dans une portée connue* 2x*?*

On calculera $\dfrac{\text{ch}\, u - 1}{u}$ à l'aide de (7).

$t + py$ et s seront donnés à l'aide des tables par (10) et (6).

4. *Quelles sont la flèche* y *et la longueur* 2s *qui correspondent à une tension donnée dans une portée connue* 2x*?*

1° La tension donnée est celle du point le plus haut.

On calculera $\frac{\operatorname{ch} u}{u}$ à l'aide de (5).

s et t se calculeront à l'aide des tables par (4) et (2).

On aura py par différence ou à l'aide de (7).

2° La tension donnée est celle du point le plus bas,

u se calculera à l'aide de (1).

py sera donné par les tables à l'aide de (2) ou de (7) et s sera donné par (4).

5. *Quelles sont la portée et la flèche qui correspondent à une tension donnée* $t + py$ *pour une longueur donnée* $2s$*?*

φ se calculera à l'aide de (8).

x et y seront donnés par les tables à l'aide de (4) et de (6).

6. *Quelle tension* $t + py$ *doit-on donner au fil pour avoir une longueur donnée* $2s$ *dans une portée connue* $2x$, *et quelle sera la flèche correspondante?*

$\mu = \frac{s}{x} - 1$ est connu.

On cherchera dans les tables le cot $\frac{\varphi}{2}$ correspondant, $t + py$ pourra se calculer à l'aide de (10)

Ou directement par les tables à l'aide de (5) et y par les tables à l'aide de (7).

7. *On se donne la tension au point le plus bas et la longueur du fil, quelles sont la flèche* y *et la portée* $2x$ *correspondantes?*

$\operatorname{sh} u$ est connu par l'équation (3), y et x se calculeront par les tables à l'aide de (6) et de (4).

§ 2. Lignes sous-marines.

1. *Quelle est la tension maximum que le filin de*

drague aura à supporter pour amener en double à bord un câble dont le poids dans l'eau de mer par unité de longueur est p, *ce câble ayant été posé avec un mou connu* μ *par un fond connu* y*?*

Nous aurons une limite inférieure du mou au relèvement et, par suite, une limite supérieure de la tension du filin de drague, en prenant le mou de la pose; on cherchera dans la colonne $\cot \frac{\varphi}{2}$ le nombre correspondant; multipliant ce nombre par $2py$, poids d'une longueur de câble égale au double de la profondeur, nous aurons la limite supérieure cherchée.

Exemple 1. Câble Marseille-Alger 1871.
Données :

p par mètre dans l'eau		0,6 kilogr.
Profondeur.	$y =$	3.000 mètres
Mou de la pose, 13,5 p. 100. . .	$\mu =$	0,135

d'où :

$$2py = 3{,}6 \text{ tonnes},$$
$$\frac{\operatorname{sh} u}{u} = 1{,}135, \quad \cot \frac{\varphi}{2} = 2{,}414.$$

La limite supérieure de la tension que le filin de drague aura à supporter sera :

$$2{,}414 \times 3{,}6 = 8{,}7 \text{ tonnes.}$$

Si le mou de la pose avait été de 6,5 p. 100 la même limite supérieure aurait été de :

$$3{,}344 \times 3{,}6 \text{ tonnes} = 12 \text{ tonnes.}$$

Exemple 2. Câble transatlantique français.
Données :

$$p = 1 \text{ kilogr.},$$
$$y = 4.000 \text{ mètres},$$
$$\mu = 0,135;$$

d'où

$$2py = 8 \text{ tonnes.}$$

Limite supérieure de la tension du filin de drague

$$2,414 \times 8 = 19,3 \text{ tonne.}$$

2. *Quelle résistance mécanique doit-on exiger d'un câble, posé par un fond connu* y, *avec un mou connu* μ, *pour l'amener en double à bord?*

On cherchera dans les tables la valeur de cot $\frac{\varphi}{2}$ correspondant au mou de la pose. une limite supérieure de la tension que le câble aura à supporter sera :

$$\frac{1}{2} py\left(\cot^2 \frac{\varphi}{2} + 1\right),$$

Exemple 1 :

$$p = 0,6 \text{ kilogr.},$$
$$y = 3.000 \text{ mètres.}$$

Avec

$$\mu = 0,135$$

la limite supérieure de la tension du câble est :

$$0,9\left[(2,414)^2 + 1\right] = 6,1 \text{ tonnes.}$$

Avec

$$\mu = 0,065$$

la limite cherchée serait de :

$$0,9\left[(3,344)^2 + 1\right] = 11 \text{ tonnes environ.}$$

Exemple 2 :

$$p = 1 \text{ kilogr.},$$
$$y = 4.000 \text{ mètres},$$
$$\mu = 0,135;$$

d'où, pour la limite supérieure cherchée,

$$2[(2,41)^2 + 1] = 13,6 \text{ tonnes.}$$

3. *On relève un câble en double, soient* T *la tension indiquée au dynamomètre et* t *le frottement, il reste à la mer un poids* π *de filin de drague, de chaîne et de grappin; à quelle distance horizontale* x *du navire le câble quitte-t-il le fond, et quelles sont les tensions exercées sur le câble au point le plus bas et au point le plus haut?*

Le poids du câble soulevé est $2ps = T - t - \pi$, il est connu, on aura déterminé t en stoppant le relèvement, on aura trouvé par exemple

$$T - t = 0,9\,T.$$

On connait aussi la distance verticale y du sommet du double au fond.

On retombe sur le problème 1 traité pour les lignes aériennes : $\cot\frac{\varphi}{2}$ sera donné par (6) :

$$\cot\frac{\varphi}{2} = \frac{2ps}{2py} = \frac{0,9\,T - \pi}{2py},$$

x sera donné par (7)

La tension du câble au point le plus bas par (9) et la tension au point le plus haut par (10).

Exemple 1 :

$$p = 0,6 \text{ kilogr. par mètre,}$$
$$y = 2.400 \text{ mètres,}$$
$$\pi = 1,8 \text{ tonne,}$$
$$T = 9,5;$$

d'où

$$\cot\frac{\varphi}{2} = \frac{0,9 \times 9,5 - 1,8}{0,6 \times 4,8} = 2,34.$$

mou au relèvement correspondant

14,5 p. 100.

Longueur du double relevé :

$$10^3 \times 2{,}34 \times 4{,}8 = 11.230 \text{ mètres.}$$

Tension du câble au point le plus bas :

$$t = 0{,}72[(2{,}34)^2 - 1] = 3{,}2 \text{ tonnes.}$$

Tension du câble au point le plus haut :

$$t + py = 4{,}7 \text{ tonnes.}$$

Distance horizontale à laquelle le câble quitte le fond :

$$x = \frac{2.400}{0{,}49} = 4.900 \text{ mètres environ.}$$

Exemple 2 :

$$p = 1 \text{ kilogr. par mètre},$$
$$y = 3.400 \text{ mètres},$$
$$\pi = 1{,}5 \text{ tonne},$$
$$T = 19 \text{ tonnes};$$

d'où

$$\cot \frac{\varphi}{2} = \frac{0{,}9 \times 19 - 1{,}5}{6{,}8} = 2{,}34.$$

mou au relèvement correspondant

14,5 p. 100.

Longueur du double relevé :

$$10^3 \times 2{,}34 \times 6{,}8 = 19.000 \text{ mètres environ.}$$
$$t = 7{,}6 \text{ tonnes.}$$
$$t + py = 11 \text{ tonnes},$$
$$x = \frac{3\ 400}{0{,}49} = 6.900 \text{ mètres environ.}$$

4. *Les données sont les mêmes que dans le problème*

précédent, on s'impose en outre de ne pas dépasser pour le câble et le filin de drague les charges de sécurité respectives T_c T_d, *peut-on achever le relèvement du double?*

Cot $\frac{\varphi}{2}$ se calculera comme dans le problème précédent :

A mesure qu'on relève le double, le mou, supposé uniforme, se rassemble et le cot $\frac{\varphi}{2}$ correspondant diminue.

Il suffira donc pour qu'on puisse amener le double à bord, en restant dans les conditions imposées, que l'on ait, h désignant la profondeur :

$$T_c > \frac{1}{2} ph\left(\cot^2 \frac{\varphi}{2} + 1\right),$$

$$T_d > 2ph \cot \frac{\varphi}{2}.$$

Naturellement, on aura tenu compte, pour la limite de résistance imposée au filin de drague T_d, de la tension de flexion aux passages sur les poulies.

Exemple 1. Mêmes données que dans l'exemple 1 du problème 3

$$h = 3.000 \text{ mètres}.$$

On devra avoir :

$$T_c > 6 \text{ tonnes},$$
$$T_d > 8,5 \text{ tonnes}.$$

Exemple 2. Mêmes données que dans l'exemple 2 du problème 3

$$h = 4.000 \text{ mètres}.$$

On devra avoir :

$$T_c > 13 \text{ tonnes},$$
$$T_d > 19 \text{ tonnes}.$$

§ 3. Dragages.

On se propose de draguer par un fond connu y *avec un type donné de filin de drague, quelle touée faut-il filer et quelle sera la tension de dragage?*

Supposons que le navire se meuve avec une vitesse uniforme, entraînant avec lui la ligne de drague; si l'eau ne présentait pas de résistance au déplacement du filin de drague, que le fond soit uniforme, la forme prise par le filin de drague serait une chaînette et les formules précédentes s'appliqueraient rigoureusement.

L'expérience nous a montré qu'en raison de la faible vitesse du navire pendant le dragage elles étaient encore pratiquement applicables. Tout sera donc déterminé lorsqu'on connaîtra la tension de dragage dans le fond t.

C'est le problème 2 sur les lignes aériennes et les formules à appliquer sont :

$$1 + \frac{py}{t} = \operatorname{ch} u; \tag{2}$$

$$1 + \tau = \frac{s}{y} = \cot \frac{\varphi}{2} \tag{6}$$

La tension de dragage sera $t + py$.

La première de ces formules donnera $\operatorname{ch} u$; la seconde la touée minimum τ qu'il conviendra de filer.

$\operatorname{ch} u$ est une fonction croissante de u, $\cot \frac{\varphi}{2}$ une fonction décroissante de u; ces formules montrent donc que plus le poids d'une longueur de filin égale à la profondeur sera considérable, plus sera faible la touée à filer.

Ainsi, toutes choses égales d'ailleurs, il conviendra

de filer plus de touée avec un type de filin plus léger et moins de touée avec une profondeur plus grande.

Pour que le dragage soit effectif, c'est-à-dire pour que le grappin laboure le fond uniformément et non par ressauts, la tension de dragage dans le fond doit être suffisante pour traîner la chaîne et le grappin, à la vitesse du navire.

La règle pratique suivante pour les dragages par grands fonds nous paraît pouvoir être adoptée :

Pour draguer à une vitesse de 1 nœud à 1 nœud 5 (à peu près $0^m,50$ à $0^m,75$ à la seconde), il convient de prendre pour tension de dragage dans le fond t à peu près le double du poids de la chaîne et du grappin.

Cette tension ne devra jamais être inférieure à une tonne. On filera la touée correspondante donnée par les tables.

Exemple 1 :

$$y = 3.000 \text{ mètres},$$

poids par mètre dans l'eau du filin de drague $p = 1,6$ kg.

$$t = 1,2 \text{ tonne},$$

$$\text{ch}\, u = 1 + \frac{py}{t} = 1 + \frac{4,8}{1,2} = 5,$$

$$u = 2,40,$$

$$\cot \frac{\varphi}{2} = 1,20,$$

$$x = \frac{3,000}{1,96} = 1.530.$$

On filera 20 p. 100 de touée. La chaîne sera, à une distance horizontale du navire, de 1530 mètres.

Exemple 2 :

$$y = 4.250 \text{ mètres},$$
$$p = 1 \text{ kilogr.}$$

$$t = 1{,}2 \text{ tonne},$$
$$\operatorname{ch} u = 1 + \frac{4{,}2}{1{,}2} = 4{,}5,$$
$$\cot\frac{\varphi}{2} = 1{,}245.$$

La touée à filer est de 25 p. 100. La chaîne sera à une distance horizontale du navire de 2600 mètres environ.

Ainsi, dans ce second exemple, quoique la profondeur soit plus grande que dans le premier, la touée à filer est supérieure, le filin de drague étant beaucoup plus léger.

§ 4. Régime permanent d'une ligne soumise a une force électromotrice constante (*).

Soit une ligne électrique de longueur l.

Appelons R, R′, les résistances totales de conductibilité et d'isolement;

ρ et ρ' les résistances de conductibilité et d'isolement par unité de longueur.

Soient : E la force électromotrice appliquée au point $x=0$; V et i le potentiel et l'intensité de courant, à la distance x de l'origine, dans le régime permanent.

Posons :

$$u = \left(\frac{R}{R'}\right)^{\frac{1}{2}} = l\left(\frac{\rho}{\rho'}\right)^{\frac{1}{2}},$$
$$I = \frac{E}{R}$$

(*) M. Barbarat a étudié la même question dans les *Annales télégraphiques*; il a publié des tables numériques en prenant comme variable le rapport des résistances mesurées de conductibilité et d'isolement, c'est-à-dire $\sin^2\varphi$.

1° Supposons la ligne mise à la terre en l, on a :

$$\frac{V}{E} = \frac{\operatorname{sh} u\left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\operatorname{sh} u},$$

$$\frac{i}{I} = u \frac{\operatorname{ch} u\left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\operatorname{sh} u}.$$

Le courant au départ est :

$$i_t = I \frac{u}{\operatorname{th} u},$$

et le courant à l'arrivée est :

$$I \frac{u}{\operatorname{sh} u}.$$

2° Supposons la ligne isolée en l :

$$\frac{V}{E} = \frac{\operatorname{ch} u\left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\operatorname{ch} u},$$

$$\frac{i}{I} = u \frac{\operatorname{sh} u\left(1 - \frac{x}{l}\right)}{\operatorname{ch} u}$$

Le courant au départ est :

$$I u \operatorname{th} u,$$

et le potentiel à l'arrivée est :

$$E \frac{1}{\operatorname{ch} u}.$$

Soient R_t R_t les résistances mesurées de conductibilité et d'isolement :

$$\frac{R_t}{R} = \frac{E}{i_t} : \frac{E}{I} = \frac{I}{i_t} = \frac{\operatorname{th} u}{u},$$

$$\frac{R_i}{R} = \frac{I}{I_i} = \frac{1}{u \operatorname{th} u},$$

$$R_t R_i = \frac{R^2}{u^2} = R R' = \rho\rho'.$$

Ainsi, en posant :

$$u = \left(\frac{R}{R'}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

On a :

$$\text{th}\, u = \left(\frac{R_t}{R_i}\right)^{\frac{1}{2}},$$

$$R = \frac{u}{\text{th}\, u} R_t,$$

$$R' = \frac{\text{th}\, u}{u} R_i.$$

Connaissant les résistances mesurées de conductibilité et d'isolement, on aura th$u$ = sin φ en extrayant la racine carrée du rapport, u sera donné par les tables et on calculera les résistances vraies d'après les formules ci-dessus.

Le rapport des intensités du courant au départ et à l'arrivée dans le cas d'une ligne à la terre est égal au rapport des potentiels au départ et à l'arrivée, la ligne étant isolée; la valeur de ce rapport est $\text{ch}\, u = \frac{1}{\cos \varphi}$, c'est le rapport des tensions aux points M et O de la chaînette, de paramètres u et O.

Soit I_m le courant nécessaire à l'arrivée pour y faire fonctionner un appareil donné.

Si la ligne était parfaitement isolée, il suffirait de mettre au départ une pile de force électromotrice

$$E_m = I_m R.$$

Soit E la force électromotrice, nécessaire au départ, pour qu'en tenant compte de la perte par isolement le courant à l'arrivée soit I_m.

Le courant au départ sera I_m ch$u$ et l'on aura :

$$I u \frac{\text{ch}\, u}{\text{sh}\, u} = I_m\, \text{ch}\, u;$$

d'où

$$I_m = \frac{E}{R}\frac{u}{\mathrm{sh}\,u} = \frac{E_m}{R},$$

$$\frac{E}{E_m} = \frac{\mathrm{sh}\,u}{u}.$$

Le coefficient d'augmentation du potentiel à l'origine est $\frac{\mathrm{sh}\,u}{u}$, et le pour cent d'éléments qu'il faudra ajouter au départ, pour avoir à l'arrivée le même courant que si la ligne était parfaitement isolée, est donné par le mou de l'arc de chaînette OM :

La demi-portée étant la longueur de la ligne ;

Le poids du fil par unité de longueur étant exprimé par la racine carrée de la résistance de conductibilité par unité de longueur ;

Et la tension horizontale au point le plus bas de la chaînette étant exprimée par la racine carrée de la résistance d'isolement par unité de longueur.

H. LAROSE.
Ingénieur des Télégraphes.

ÉLECTROMÈTRE ABSOLU

POUR PETITES DIFFÉRENCES DE POTENTIEL (*)

Les grandeurs que l'on rencontre en électricité, quantité d'électricité, différence de potentiel, intensité de courant, résistance, etc., ne se présentent pas avec la même simplicité lorsqu'on veut les relier aux unités fondamentales d'un système de mesures, du système C. G. S. par exemple. Une pareille détermination constitue une mesure en valeur absolue. On est amené à passer par l'intermédiaire d'une force, pour toutes les grandeurs dans les dimensions desquelles entre la masse dans le système d'unités choisi.

Dans le système électrostatique, les grandeurs immédiatement abordables sont : la quantité d'électricité, la différence de potentiel, la capacité; dans le système électro-magnétique, ce sont : l'intensité de courant, la différence de potentiel, la résistance; celles d'entre elles qui, se présentant immédiatement et

(*) *Journal de physique*, 3e série. t. VII, 1898, p. 317.

Ce travail a fait l'objet de plusieurs mémoires étendus : Sur les franges des lames minces argentées et leur application à la mesure de petites épaisseurs d'air (*Ann. de Ch. et de Phys.*, décembre 1897); Électromètre absolu pour petites différences de potentiel (*Idem*, mars 1898); Sur une nouvelle mesure du coefficient de viscosité de l'air (*Idem*, février 1898); Mesure de la force électromotrice de la pile Latimer-Clark à 0° en fonction du volt international, au moyen de l'électrolyse de l'azotate d'argent *Ann. de la Faculté des sciences de Marseille*, t. VIII, p. 205, 1898).

indépendamment des autres, sont reliées directement aux unités mécaniques, sont : la différence de potentiel en électrostatique et l'intensité de courant en électromagnétisme, d'où la possibilité de construire des électromètres et des électro-dynamomètres absolus.

Si V est la différence de potentiel électrostatique entre deux corps dont l'un est isolé et l'autre relié aux parois d'une enceinte qui enveloppe le système, il se produit entre eux une force mécanique F toujours attractive, qui tend à accroître l'énergie électrostatique du système, si la différence de potentiel est maintenue constante ; la relation qui relie V à F est de la forme

$$F = AV^2,$$

où A est un coefficient purement numérique, dépendant seulement de la forme du système, et qui ne varie pas quand il se modifie en restant semblable à lui-même. Chaque électromètre est caractérisé par la valeur de A et par ses dimensions, la valeur de A à elle seule définissant la sensibilité de l'appareil. Elle peut d'ailleurs, au moins théoriquement, être calculée, étant donnée la forme géométrique de l'appareil, soit directement, soit en partant de l'expression de la capacité et appliquant le théorème des corps à potentiels constants.

Dans les électromètres sensibles on s'efforce seulement de rendre A aussi grand que possible ; dans les appareils absolus, il faut, en outre, qu'on puisse l'exprimer en fonction des dimensions de l'appareil, ce qui conduit à donner à celui-ci une forme géométrique simple. Dans les appareils absolus actuellement employés, la valeur de cette constante (qui, étant

purement numérique, est indépendante du choix des unités de longueur, temps et masse) est toujours assez faible; dans l'appareil de lord Kelvin, elle est d'environ 5, elle est de 1/4 dans celui de MM. Bichat et Blondlot. Dans l'appareil que nous avons construit, sa valeur est au contraire très élevée, à peu près 10 000 en moyenne. Aussi notre appareil peut-il être employé pour la mesure de faibles différences de potentiel, une vingtaine de volts, sans l'emploi d'un potentiel auxiliaire élevé, en suivant rigoureusement le mode idiostatique.

Notre électromètre est un appareil à plateaux, dans lequel la distance des deux plans est extrêmement petite, $0^{mm},1$ environ; la force attractive est aussi considérablement augmentée, car elle varie à peu près en raison inverse du carré de la distance. L'emploi d'aussi faibles distances exige que les surfaces soient parfaitement planes et que leur écartement puisse être mesuré avec une grande précision, que seules les méthodes interférentielles pouvaient nous fournir. Nous avons été ainsi conduits à constituer les plateaux de notre électromètre par des disques de verre recouverts d'une couche d'argent conductrice, assez mince pour être transparente. L'étude des interférences produites entre ces deux surfaces permet la mesure précise de la distance des plateaux, comme on l'expliquera plus loin.

Avec des plateaux en verre aussi rapprochés on ne peut employer d'anneau de garde; nous avons en conséquence constitué le plateau inférieur de l'appareil par la base plane d'un cylindre droit à arête vive, argenté sur les faces supérieure et latérale; le plateau supérieur est un disque de verre d'un diamètre

sensiblement plus grand, qui joue le rôle d'un plateau indéfini.

L'élégante méthode exposée par M. Potier (*) permet d'étudier la distribution électrique sur un pareil système, en négligeant la courbure du disque, dont le rayon est extrêmement grand par rapport à la distance des plateaux. La *fig.* 1 donne la forme des lignes de force et des courbes de niveau dans une section méridienne de l'appareil.

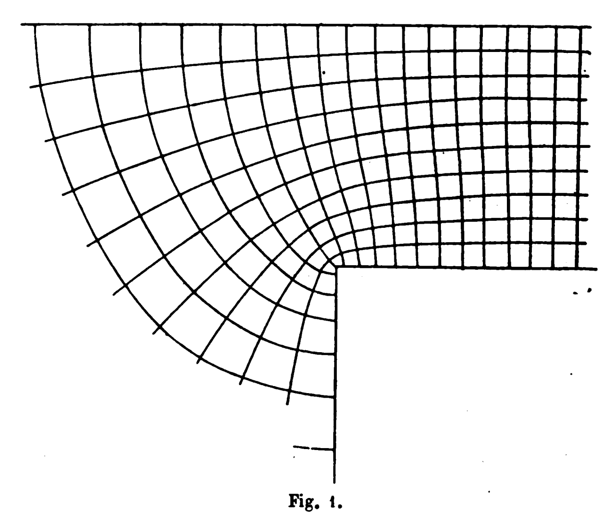


Fig. 1.

Un disque de rayon R et un plan parallèle indéfini situés à une distance h s'attirent avec la même force que le feraient un disque de rayon $R + \frac{2h}{\pi}$ et un plan indéfini, chargés uniformément, la densité étant partout la même que si les surfaces étaient infinies. Il suffira dès lors d'augmenter, pour le calcul, le rayon

(*) Traduction française du *Traité d'électricité* de Maxwell, t. II, p. 553.

de $\frac{2h}{\pi}$ et de ne pas tenir compte des variations de distribution aux bords. La force attractive sera donc :

$$F = \frac{\left(R + \frac{2h}{\pi}\right)^2 V^2}{8h^2}$$

On voit que, pour calculer V, il suffit de mesurer R et h (qui n'entrent que par leur rapport) et la force F. Les deux premières quantités seront mesurées par une méthode interférentielle, et rapportées ainsi à une même unité. Au lieu de mesurer la force F produite par une différence de potentiel donnée, nous avons préféré faire l'inverse et chercher la différence de potentiel qui produit une force attractive égale au poids d'une surcharge de masse connue. Cette différence de potentiel peut être alors calculée en unité absolue. On la compare immédiatement avec celle que l'on veut mesurer par la méthode d'opposition.

Nos mesures ont été rapportées à la force électromotrice à 0° de l'étalon Latimer-Clark; c'est à cet étalon qu'il faudra comparer la différence de potentiel qui vient d'être obtenue en valeur électrostatique.

Tel est le principe de la méthode employée. Nous allons entrer maintenant dans quelques détails sur la disposition de l'appareil, la manière de faire une mesure et les résultats obtenus.

Description de l'appareil.

L'appareil débarrassé de la cage qui le contient est représenté par la *fig.* 2. Le plateau inférieur est

constitué par la base plane d'un cylindre de verre ayant 6 centimètres de diamètre environ et 1 centimètre d'épaisseur. Une plaque de laiton, percée en

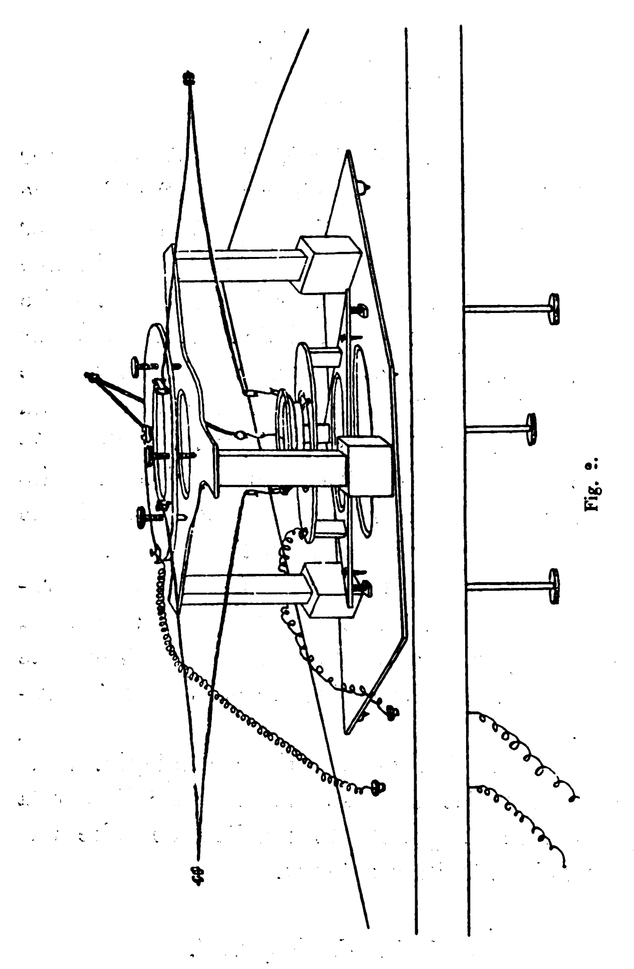


Fig. 2.

son centre d'une ouverture un peu plus grande que le disque, porte celui-ci au moyen de trois taquets, en sorte que presque toute sa surface peut être traversée

par la lumière. Deux fils tendus en croix sur l'ouverture de la plaque marquent le centre du disque de verre. Le disque et la plaque qui le porte sont isolés au moyen de trois cales de soufre; le tout est posé sur une plaque épaisse portée par trois vis calantes qui dépassent le fond de la boite contenant l'appareil. On peut ainsi orienter le disque, qui restera fixe pendant une mesure.

L'autre plateau, sensiblement plus large, fait l'office de plateau indéfini; il est en verre mince (épaisseur : 2 millimètres); un repère tracé sur sa face supérieure en indique le centre et permet de le centrer par rapport au disque inférieur. Le plateau supérieur est suspendu à une très petite distance au-dessus de l'autre, par un système de trois ressorts, qui fléchit de 1 μ sous l'action d'une surcharge de 3 milligrammes environ. Le disque, avec les ressorts qui le soutiennent, est isolé par trois cales de soufre.

Pour éviter toute trépidation, l'appareil a été placé dans une cage vitrée, suspendue par des caoutchoucs au plafond d'une cave.

Sur le plateau supérieur on peut à volonté déposer sans secousse une surcharge de quelques centigrammes, exactement pesée, consistant en une boucle de fil de platine; son mouvement (*) est obtenu par une communication pneumatique. C'est le poids de cette surcharge qui devra produire exactement le même effet que l'attraction électrique F; pour cela, il ne suffit pas que les deux forces soient égales, il faut encore qu'elles soient appliquées au même point. On

(*) L'appareil destiné à produire ce mouvement a été supprimé sur la *fig.* 2, pour ne pas la compliquer inutilement; cet appareil est représenté à part dans la *fig.* 3 sur laquelle la surcharge se voit en A.

arrive à ce résultat en modifiant convenablement le point où se pose le poids suivant un procédé de réglage qui sera exposé plus loin.

Les plateaux sont recouverts d'une couche d'argent assez mince pour laisser passer une quantité appréciable de lumière. Le procédé Martin, avec des bains étendus d'une quantité d'eau convenable, nous a permis d'y arriver.

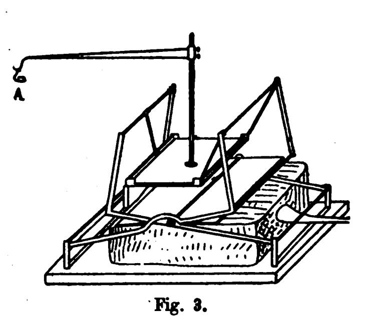


Fig. 3.

L'appareil doit pouvoir être traversé par un faisceau lumineux, vertical. Ce faisceau, primitivement horizontal, subit deux réflexions successives, sous l'incidence de 45° sur deux miroirs, l'un vertical, l'autre incliné à 45° sur l'horizontale ; il peut être ainsi dirigé verticalement suivant une direction donnée, de manière à couvrir la surface totale des lames. Après la traversée de l'appareil, il est renvoyé horizontalement par un troisième miroir placé au-dessus, reçu par l'observateur qui, selon les cas, observe à l'œil nu ou avec une lunette visant les plateaux de l'électromètre.

Les contacts sur les deux disques sont pris en dehors des régions utiles et ne troublent en rien le phénomène électrique.

Production d'une différence de potentiel variable.

La méthode employée exige, comme on l'a vu, que l'on puisse établir entre les plateaux de l'électro-

mètre une différence de potentiel variable à volonté. Nous nous sommes servis pour cela d'une batterie de 13 accumulateurs Fulmen, dont l'un C, était fermé sur deux boîtes des résistances égales BB′ (*fig.* 4,) suivant la méthode indiquée par M. Bouty. En faisant varier le nombre d'accumulateurs pris dans la batterie A (ce que l'on fait commodément au moyen d'un coupleur à godets de mercure), on peut faire varier la différence de potentiel de 0 à 24 volts par degrés de 2 volts environ. Les fractions de 2 volts s'obtiennent en faisant varier la résistance de la boîte B, la somme des résistances B et B′ étant maintenue constante (11 110 ohms). On peut ainsi faire varier la différence de potentiel par degrés de $0^{v},0002$, ce qui est bien plus que suffisant. Les accumulateurs Fulmen nous ont donné pleine satisfaction; leur force électromotrice baisse très régulièrement d'environ $\frac{1}{100000}$ de leur valeur par heure. Pendant la durée d'une mesure, on peut la considérer comme parfaitement constante.

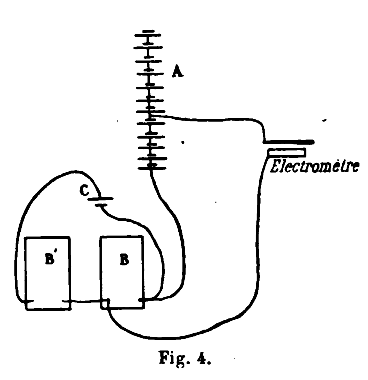


Fig. 4.

Chacun de ces accumulateurs est, avant ou après la mesure, comparé par la méthode d'opposition avec l'étalon que l'on veut mesurer en valeur absolue, au moyen d'un électromètre capillaire qui donne le $\frac{1}{40000}$ de volt.

Nous avons été amenés, pour éviter toute erreur

due aux défauts d'isolement, à démonter nos boîtes de résistance et à les remonter sur des pièces isolées avec un mélange de soufre et de paraffine; on les a réétalonnées après cette opération. L'isolement de l'ensemble de l'installation (électromètre, batterie, boîte de résistance) était tel que l'appareil relié à un électroscope à feuilles d'or et chargé au moyen d'une bouteille de Leyde, puis isolé de celle-ci, conservait encore une charge appréciable au bout d'un quart d'heure.

L'étalon auquel nous avons rapporté toutes nos mesures est l'étalon Latimer-Clark employé à 0° (ce qui est la meilleure manière de l'employer). Une série de ces piles, de la forme en H, construites avec des produits d'origine différente et de deux dispositions différentes concordent au dix-millième de volt. Ces piles concordent aussi d'une manière satisfaisante avec un étalon de M. Carpentier et un de la maison Fuess, de Berlin; ces derniers ne peuvent malheureusement pas être employés d'une façon commode à 0°.

Mesure de la distance des plateaux.

Les méthodes employées pour régler le parallélisme des plateaux et évaluer leur distance sont des méthodes optiques, basées sur les propriétés des lames minces argentées; nous allons exposer ces propriétés.

Quand de la lumière homogène traverse ce que nous appellerons une *lame mince argentée* (lame mince d'air comprise entre deux lames de verre argenté), il se produit des phénomènes d'interférence dont l'aspect est différent des phénomènes ordinaires des lames minces, à cause du pouvoir réflecteur élevé des faces

de lame, qui a pour effet de donner une importance considérable aux réflexions multiples.

Si Δ est la différence de marche entre l'onde directe et l'onde qui a subi deux réflexions, les ondes successives présentent avec l'onde directe des différences de marche 2Δ, 3Δ, 4Δ, et leurs intensités vont en décroissant, mais pas très rapidement. Si Δ est un nombre entier de longueurs d'onde, toutes ces ondes sont concordantes et l'on a maximum de lumière; mais, pour peu que Δ diffère d'un nombre entier, parmi les ondes plusieurs fois réfléchies, il s'en trouve qui ont avec l'onde directe une différence de marche qui diffère beaucoup d'un nombre entier de longueurs d'onde, et qui par suite affaiblissent beaucoup l'amplitude résultante.

Les franges auront donc l'aspect de lignes brillantes très fines tracées sur un fond presque complètement sombre. Le phénomène a quelque analogie avec celui qui se passe dans un réseau; dès qu'on s'écarte d'un maximum d'intensité, la lumière décroît très rapidement, à cause de l'existence d'ondes dont la différence de marche varie d'une manière très rapide.

D'ailleurs, un calcul dû à Airy permet de faire la théorie complète du phénomène et de calculer l'intensité lumineuse I en fonction de la différence de marche Δ. La fig. 5 montre la variation de cette fonction, en supposant le coefficient de réflexion égal à 0,75.

A une distance du maximum égale à 1/10e de frange, l'intensité n'est que 1/6e de sa valeur maximum. La courbe montre que la répartition de la lumière est tout à fait différente de ce qu'elle est dans un phénomène

d'interférence ordinaire, dans lequel on a seulement deux ondes interférentes; la courbe d'intensité est alors une sinusoïde dont les minima sont nuls, si les deux ondes ont même intensité. Dans le cas de lames argentées, la faible quantité de lumière que laissent passer les deux argentures se répartit, lorsque l'éclairement est monochromatique, sur des lignes très fines dont l'intensité lumineuse peut être relativement grande.

Lorsque la lumière incidente est composée de plu-

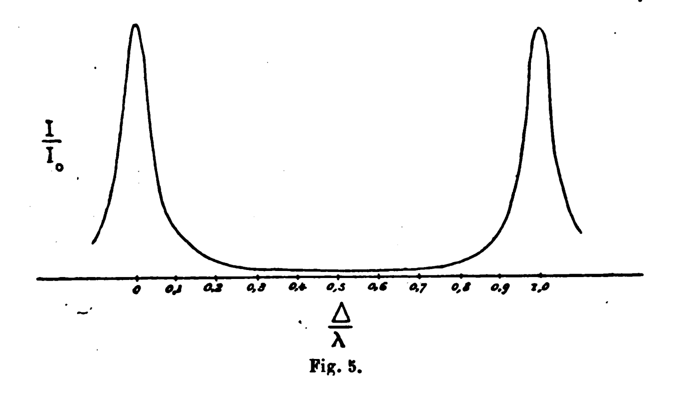


Fig. 5.

sieurs radiations simples, chacune donne son système de franges et ces systèmes se juxtaposent sans se fondre, à cause de la finesse des franges brillantes. C'est ainsi qu'avec la double radiation jaune du sodium on obtient deux systèmes de franges qui, confondus lorsque l'épaisseur de la lame mince est très faible, se séparent peu à peu à partir de la 80ᵉ frange environ. Lorsqu'on arrive à la 500ᵉ, la séparation est complète, en sorte que les franges données par la radiation D_1 sont exactement intercalées entre celles que donne D_2. Au delà, les franges

tendent à se confondre de nouveau et la réunion est complète lorsqu'on arrive à la 1000e frange, puis vient un nouveau dédoublement, etc. Les disparitions de franges observées par Fizeau sont remplacées par les dédoublements. Ces dédoublements ont été observés par M. Boulouch (*).

En employant comme lumière celle qu'émet un brûleur contenant à la fois des sels de sodium et de lithium, on obtient le système de franges jaunes et un système de franges rouges. Une coïncidence exacte ou approchée entre une frange jaune et une frange rouge se produit toutes les 8 franges environ. On peut calculer les numéros d'ordre des franges pour lesquelles ce phénomène se produit, et les franges se trouvent ainsi numérotées de 8 en 8 environ. Les coïncidences exactes sont beaucoup plus rares, en sorte que le phénomène permet de déterminer le numéro d'ordre exact de certaines franges, pourvu que l'on ait une valeur approchée de ce numéro.

A part les particularités que nous venons d'expliquer, les franges des lames minces argentées jouissent de toutes les propriétés des franges des lames minces ordinaires ; chaque frange dessine une *courbe d'égale épaisseur* de la lame mince et cette épaisseur croît d'une demi-longueur d'onde d'une frange à la suivante. Les franges sont d'autant plus écartées que les surfaces argentées sont plus près d'être parallèles. Ce sont ces franges en lumière jaune du sodium qui nous ont servi au réglage des plateaux de notre électromètre. Si ces plateaux étaient rigoureusement plans, on verrait les franges disparaître complètement

(*) *Journal de Physique*, 3e série, t. II, p. 316, 1893.

lorsqu'on arriverait au parallélisme parfait. En réalité, ces plateaux ont toujours une très faible courbure. On doit amener les franges à avoir le plus grand écartement possible; elles se présentent alors ordinairement sous la forme d'anneaux très écartés, au nombre de un ou deux sur la surface du disque. La distance des deux plateaux est, par suite, un tout petit peu variable d'un point à un autre. Il est facile de voir que la distance h qui doit figurer dans la formule est alors la distance moyenne, c'est-à-dire une distance telle que le cylindre qui a pour base la surface du disque inférieur et pour hauteur h, ait le même volume que le solide réellement compris entre les deux plateaux. Supposons que l'on ait mesuré la distance h_0 des deux plateaux comptée sur la verticale qui passe par le centre du plateau inférieur. La distance moyenne h ne diffère de la distance au centre h_0 que par une très petite correction et cette correction ne dépend que de la forme des surfaces, et non des très petites variations que peut subir l'orientation du plateau supérieur. On peut donc poser :

$$h = h_0 + \varepsilon;$$

ε pourra être déterminée une fois pour toutes, avant ou après une série d'expériences; sa valeur serait nulle si les surfaces de verre étaient rigoureusement planes.

Pour déterminer cette correction, il suffit de connaître, pour une position arbitrairement choisie du plateau supérieur, la forme du solide contenu entre les deux plateaux. On y arrive en dessinant ou en photographiant les franges produites en lumière monochromatique dans la lame d'air qui sépare les

deux surfaces. Ces franges représentent les lignes d'égale épaisseur de cette lame; elles permettent, en se servant du planimètre, de déterminer le volume de ce solide et par suite son épaisseur moyenne, d'où l'on déduit la correction ε, qui restera constante tant que les surfaces ne subiront pas de déformation. Cette correction, exprimée en demi-longueurs d'onde de la raie du sodium, a varié de $-0{,}03$ à $+0{,}20$. Il faut la déterminer à nouveau chaque fois que l'appareil a été démonté, parce que le disque supérieur, que l'on a pris en verre mince pour diminuer son poids, subit pendant le montage de petites déformations qui ne sont pas toujours les mêmes.

Tout revient à déterminer l'épaisseur au centre de la lame d'air qui sépare les deux plateaux. Cette détermination est faite par comparaison avec *l'épaisseur de lames étalons*, grâce à l'existence de franges en lumière blanche, qui ont la plus grande analogie avec celles que Brewster (*), puis M. Meslin (**) ont étudiées dans le cas de lames minces ordinaires et que nous appellerons *franges de superposition*.

Supposons que l'on éclaire par de la *lumière blanche* le système formé par deux lames argentées parallèles superposées A et A′; l'une de ces lames sera supposée d'épaisseur parfaitement uniforme, tandis que l'autre est légèrement prismatique, en sorte que son épaisseur varie d'un point à un autre. La lumière traverse normalement ce système.

Parmi les rayons auxquels donne naissance un rayon incident, on peut en particulier considérer les deux suivants :

(*) Brewster, *Edinb. Trans.*, t. VII, p. 435, 1817.
(**) Meslin, *Journal de Physique*, 3e série, t. III, p. 489, 1894.

1° Celui qui traverse directement A et subit deux réflexions dans la lame A′;

2° Celui qui subit deux réflexions dans la lame A et traverse directement A′.

La différence de marche de ces deux rayons est :

$$2(e-e'),$$

e et e' étant les épaisseurs optiques des deux lames au point considéré.

Elle est nulle si $e=e'$. On aura donc une frange blanche qui dessine le lieu des points où les épaisseurs des deux lames sont les mêmes.

Cette frange est bordée de part et d'autre de franges colorées, les lignes d'égale coloration dessinant les lignes d'égale différence d'épaisseur des deux lames.

On remarquera que d'autres couples de rayons concourent à la production du phénomène, car au rayon qui a subi $2n$ réflexions dans A et $2p$ dans A′ on peut associer celui qui a subi $2(n-1)$ réflexions dans A et $2(p+1)$ dans A′. Le rayon direct seul reste isolé. Aussi ces franges sont-elles douées d'un vif éclat et les colorations extrêmement brillantes. La frange centrale blanche se reconnaît toujours avec facilité et permet de trouver immédiatement les points où les deux lames ont la même épaisseur.

Les franges en lumière blanche n'apparaissent pas seulement lorsque les épaisseurs sont égales, mais aussi toutes les fois que ces épaisseurs sont entre elles dans un rapport simple; elles sont alors produites par l'interférence des rayons qui ont subi des nombres inégaux de réflexions.

On observe facilement les systèmes correspondant à :

$$\frac{e'}{e} = \frac{1}{2}, \quad 2, \quad \frac{2}{3}, \quad \frac{3}{2}, \quad \frac{3}{4}, \quad \frac{4}{3}, \quad \ldots.$$

Toutefois, à mesure que ce rapport devient moins simple, les franges sont plus pâles, parce qu'elles sont dues à l'interférence de rayons qui ont subi un nombre de réflexions de plus en plus grand, et que non seulement le rayon direct, mais encore une partie de la lumière plusieurs fois réfléchie ne peut interférer et produit de la lumière blanche qui enlève aux teintes leur éclat.

Au lieu de superposer simplement les deux lames minces, il revient au même de projeter sur l'une d'elles l'image de l'autre au moyen d'une lentille. Les épaisseurs e, e' seront alors les épaisseurs aux points optiquement superposés des deux lames. Dans tous les cas, la lumière, ayant à traverser quatre couches d'argent, devra être très intense. Nous employons la lumière de l'arc électrique.

C'est sur l'existence de ces franges, en particulier de celles qui correspondent à l'égalité d'épaisseur, que nous avons basé la construction et l'usage de lames-étalons pour la mesure de petites épaisseurs d'air. On conçoit en effet que, si la lame A' a été préalablement étalonnée, c'est-à-dire si l'on a déterminé son épaisseur aux différents points, on pourra chercher le point de cette lame où l'épaisseur est égale à l'épaisseur à mesurer, cette égalité d'épaisseur se reconnaissant à ce que la frange blanche passe par le point considéré.

Une *lame-étalon* est constituée par le faible inter-

valle d'air compris entre deux lames planes de verre argenté, ayant 20 centimètres de long sur 5 de large et 1 centimètre d'épaisseur; sur l'une des argentures est tracée dans le sens de la longueur une ligne médiane portant une division en millimètres. Les deux lames sont séparées vers leurs extrémités par des feuilles d'étain ou des fils de platine d'épaisseurs un peu différentes, en sorte que la lame d'air qui les sépare a la forme d'un prisme très aigu. Ces lames sont alors réunies au moyen de mastic de Golaz. En lumière monochromatique, la lame mince donne une série de franges sensiblement perpendiculaires à la ligne médiane et au nombre d'une centaine pour chaque lame. Il s'agit d'étalonner une de ces lames, en sorte que l'on connaisse, par un tableau numérique ou une courbe, son épaisseur en chaque point de la graduation. On notera d'abord la position de toutes les franges produites par la lumière jaune du sodium. Le problème sera résolu si l'on détermine le numéro d'ordre de l'une de ces franges.

La méthode que nous avons employée, basée sur l'observation des franges de superposition, a été décrite dans le mémoire complet déjà cité(*).

Il suffit d'ailleurs de faire cette détermination à une ou deux unités près, si l'on a eu soin d'observer les coïncidences des raies du sodium et du lithium, qui se produisent toutes les 8 environ.

Une lame étant graduée, la graduation des autres devient facile, en cherchant par superposition un couple de points d'égale épaisseur sur les deux lames. Nous avons ainsi construit et étalonné quatre lames,

(*) *Ann. de Chimie et de Physique*, décembre 1897.

dont les épaisseurs, empiétant les unes sur les autres, vont de 105 à 440 demi-longueurs d'onde du sodium, c'est-à-dire de 32^{μ} à 130^{μ} environ. L'épaisseur en chaque point est sujette à varier avec le temps, mais toujours d'un petit nombre de franges; on pourra toujours vérifier l'étalonnage au moyen des franges du sodium et du lithium. Il faut éviter d'échauffer irrégulièrement ces lames; une cuve pleine d'eau est interposée sur le faisceau incident.

C'est au moyen de ces lames que nous avons mesuré l'épaisseur h_0 au centre de la lame d'air de notre électromètre. L'image d'une lame étalon est projetée, grâce aux miroirs inférieurs, sur cette lame mince. La mesure est extrêmement rapide, la lame mince faisant ici l'office d'une règle graduée dont les divisions, distantes de $0^{\mu},3$ environ, peuvent être à chaque instant vérifiées.

Dans ces mesures d'épaisseur, on est amené à faire subir à l'épaisseur mesurée une petite correction, pour tenir compte de la perte de phase subie par la lumière lors de sa réflexion sur l'argent. Tout se passe, pour nos argentures, comme si la réflexion se faisait, sans perte de phase, sur une surface comprise entre la surface du verre et celle du métal. C'est la distance de ces surfaces fictives de réflexion que donne la mesure optique, tandis que celle qui doit être introduite dans la formule qui donne le potentiel est la distance des surfaces métalliques. La correction dépend de l'épaisseur de la couche d'argent; elle est déterminée directement, lorsque l'appareil est démonté, par une méthode qui ne peut trouver place ici. La correction est de l'ordre du dixième de frange.

Mesure du diamètre du disque.

On a déterminé deux plans tangents à la surface latérale du disque, en serrant contre lui, à l'aide du

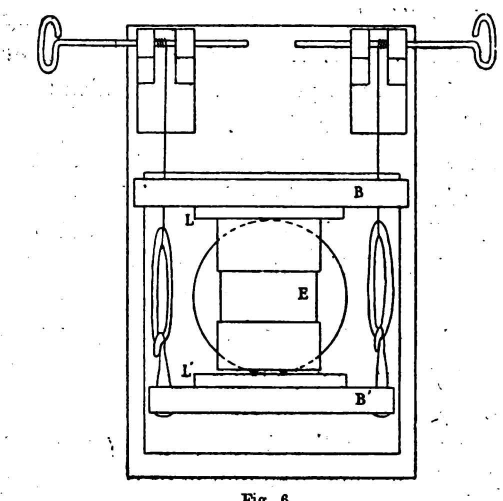


Fig. 6.

butoir B et d'une règle B' mobile au moyen de deux caoutchoucs (*fig.* 6), deux lames planes de verre LL' qu'on a rendues parallèles. Entre la surface du disque et les plans de verre se produisent des franges très fines dont l'observation en lumière blanche permet de s'assurer que les deux surfaces sont en contact.

Entre les deux plans de verre, on a placé en E un certain nombre de lames planes, étalons mesurés en longueurs d'onde par M. Macé de Lépinay, ou lames de verre comparées à ces derniers au moyen du sphéromètre de Brunner. L'ensemble de ces lames forme un système dont l'épaisseur est exactement connue; on évalue, par l'examen des colorations produites,

les petites épaisseurs d'air qui peuvent subsister entre les surfaces des étalons. L'épaisseur totale du système est un peu plus faible que le diamètre à mesurer. L'une de ses faces est appliquée contre la lame L ; il ne reste plus qu'à mesurer la petite épaisseur d'air comprise entre la lame L' et la face adjacente du système des étalons E. A cet effet, les deux surfaces ont été argentées, et leur distance est mesurée par la méthode déjà décrite au moyen des franges de superposition. Quatre mesures faites sur différents diamètres ont conduit à des résultats différents de leur moyenne d'au plus $1^{\mu},5$, ce qui montre à la fois la précision de la méthode et la perfection avec laquelle M. Jobin a réussi à tailler cette pièce.

Le diamètre ainsi mesuré est : $2\,R = 100971$ longueurs d'onde moyenne du sodium dans l'air $=$ $5^{cm},9504$ à 22°.

Marche d'une expérience.

Il faut, avant tout, amener les deux plateaux au parallélisme et à une distance convenable. Pour arriver rapidement à ce résultat, nous regarderons à travers l'appareil, en utilisant les miroirs placés au-dessus et au-dessous de lui, le filament d'une lampe à incandescence ; le moindre défaut de parallélisme des plateaux se traduit par la production d'une série d'images du filament dues aux réflexions multiples que subit la lumière sur les deux surfaces argentées. On amène, par la manœuvre des vis calantes, toutes ces images à se confondre avec le filament lui-même. On a alors obtenu un parallélisme assez rapproché pour qu'en éclairant l'appareil par la lumière du so-

dium, on voie les franges apparaître à coup sûr. L'écartement de ces franges donne un renseignement encore plus précis sur le parallélisme des plateaux; on continue à agir sur les vis jusqu'à ce que les franges paraissent aussi écartées que possible; nous ne considérons le réglage comme suffisant que lorsque le nombre des franges visibles sur la surface du disque n'excède pas 2 ou 3. Quant à la distance des surfaces argentées, elle doit être comprise entre 200 et 400 demi-longueurs d'onde du sodium, environ. On est renseigné à peu près sur cette distance par l'aspect du dédoublement produit par la double raie du sodium et aussi par l'apparition, vers l'épaisseur $300 \frac{\lambda}{2}$, de phénomènes de viscosité dans la couche d'air qui dépasse les deux plateaux, viscosité qui a pour résultat de rendre très lents les mouvements du disque supérieur, et dont l'effet devient plus prononcé à mesure que l'on diminue l'épaisseur de cette couche d'air (*).

L'appareil étant ainsi réglé et la surcharge posée sur le disque supérieur, on projette, sur la lame d'air qui sépare les deux plateaux, l'image d'une lame étalon éclairée normalement par le faisceau de lumière blanche provenant d'un arc électrique. En faisant glisser cette lame dans le sens de sa longueur, on ne tarde pas à rencontrer la région où son épaisseur est égale à la distance qui sépare les deux plateaux, ce dont on est averti par l'apparition d'un beau système de franges. Le moindre déplacement du plateau supérieur se traduit par un déplacement de ces franges.

(*) Voir *Ann. de Chimie et de Physique*, février 1898.

On détermine alors approximativement le potentiel nécessaire pour équilibrer le poids de la surcharge, de telle façon que la substitution de l'une des forces à l'autre laisse les franges à peu près dans le même aspect.

L'appareil étant chargé à ce potentiel, et la surcharge soulevée, on règle l'orientation du plateau inférieur de manière à ce qu'il soit exactement parallèle au plateau supérieur; ce réglage se fera en employant de nouveau la lumière jaune, et ne fait pas varier sensiblement la distance des plateaux. On met alors l'appareil en court circuit et on pose la surcharge; en d'autres termes, on substitue le poids de cette dernière à l'attraction électrique. Ces deux forces sont sensiblement égales; si elles étaient appliquées au même point, l'appareil ne subirait aucune modification lorsqu'on substitue l'une à l'autre. En général, il n'en sera pas ainsi, et la substitution du poids à la force électrique produira un léger basculement du plateau supérieur, qui se traduira par une déformation des franges en lumière jaune. On déplace alors la surcharge jusqu'à ce qu'en venant se poser sur le disque elle ramène exactement les franges à l'aspect qu'elles avaient lorsque la force électrique était substituée à son poids. On est sûr alors que les deux forces sont appliquées au même point. L'appareil est alors complètement réglé.

Après un repos d'une demi-heure, on vérifie en lumière jaune le parallélisme des plateaux, puis on remet en place la lame-étalon, qui doit être disposée de manière que sa ligne médiane se projette au centre du disque, qui est marqué par un repère. En faisant glisser la lame-étalon, on amène la frange blanche à

passer exactement par ce repère. On détermine alors exactement la différence de potentiel nécessaire pour équilibrer le poids de la surcharge, de telle sorte que la substitution de la force électrique au poids de la surcharge n'entraîne aucune variation dans la position de la frange blanche. On a soin de noter la division de lame-étalon sur laquelle se trouve cette frange. Immédiatement, et sans toucher à la lame-étalon, on éclaire celle-ci par la lumière d'un chalumeau qui donne les raies du sodium et du lithium, et l'on note la position de toutes les franges du sodium comprises entre deux coïncidences des raies jaunes et rouges. On a alors tout ce qu'il faut pour calculer l'épaisseur en chaque point de l'étalon, et, par suite, l'épaisseur au centre de la lame d'air qui sépare les deux plateaux de l'électromètre. La différence de potentiel employée est alors calculable en unité C. G. S. électrostatique. Comme, d'autre part, tous les accumulateurs ont été comparés avec la pile-étalon, on en déduit la valeur de celle-ci.

Nous nous sommes servis de deux surcharges, pesant respectivement $0^{gr},046670$ et $0^{gr},097101$. Ces masses ont été déterminées, au Bureau international des Poids et Mesures, par M. Benoît, auquel nous adressons nos plus sincères remerciements.

Nous avons adopté pour g la valeur $980,54 \frac{cm}{sec^2}$, résultat des mesures parfaitement concordantes faites par le colonel Defforges et par M. Collet à l'observatoire de Marseille.

Résultats. — Le tableau suivant résume l'ensemble de nos expériences.

DATES	DISTANCES des plateaux corrigés	m	V en unité étrectro-statique	V en Latimer-Clark	VALEUR de Latimer-Clark à 0° en unité électro-statique
	$\frac{\lambda}{2}$	g.			
30 décembre 1896.	296,16	0,046 670	0,0560158	11,5759	483,90 10^{-5}
Id.	390,81	id.	0,0738747	15,2494	484,43
31 décembre 1897.	294,11	0,097 101	0,802 403	16,5369	485,22
4 janvier 1897. .	263,08	id.	0,717 890	14,8355	483,90
7 janvier 1897. .	382,31	0,046 670	0,722 701	14,9112	484,67
Id. . .	382,40	id.	0,722 895	14,9112	484,80
9 janvier 1897. .	269,27	id.	0,509 391	10,5331	483,61
11 janvier 1897. .	298,68	0,097 101	0,814 870	16,8122	484,69
Id. . .	299,32	id.	0,816 6?7	16,8545	484,51
Id. . .	297,04	id.	0,810 401	16,5976	485,34
		Moyenne.			485,51 10^{-5}

avec une erreur probable de $0,11 \times 10^{-5}$, ou $\frac{1}{4000}$ en valeur relative.

D'autre part, nous avons déterminé la valeur de notre pile à 0° en *volts internationaux*. Un courant d'intensité constante ($0^{amp},3$ environ) traverse une résistance d'environ 5^{ω}, mesurée en ohms internationaux, ainsi qu'un voltamètre à azotate d'argent. L'intensité du courant est maintenue telle que la différence de potentiel aux bornes de la résistance étalonnée soit égale à la force électromotrice d'un Latimer-Clark à 0°. Après un certain temps (une à deux heures), on arrête le courant, et l'on pèse l'argent déposé, ce qui fait connaître l'intensité du courant en fonction de l'*ampère international* (courant qui dépose par seconde $1^{mg},118$ d'argent). On a alors tout ce qu'il faut pour calculer la force électromotrice de la pile en fonction du volt international (différence de potentiel aux bornes d'une résistance de 1 ohm international traversée par un courant de 1 ampère international).

Ces mesures, dont le détail fait l'objet d'un mémoire publié dans les *Annales de la Faculté des sciences de Marseille* (*), nous ont conduits au résultat suivant :

Latimer-Clark à 0° = 1,4522 *volts internationaux*.

Il était intéressant de savoir si nos piles sont comparables avec celles dont se servent les autres expérimentateurs. Or, la force électromotrice de la pile Clark n'a jamais été mesurée à 0° en fonction du volt international. Par contre, de nombreuses mesures ont été faites pour déterminer sa valeur à 15°, et l'on sait que le Congrès de Chicago a indiqué le nombre 1,434 comme représentant en volts internationaux la force électromotrice de la pile Clark à 15°. Nous avons donc comparé les valeurs de nos piles à 0° et à 15°, et trouvé :

$$\frac{\text{Latimer-Clark à } 15^\circ}{\text{Latimer-Clark à } 0^\circ} = 0{,}98753.$$

D'où résulte : Latimer-Clark à 15° = 1,4341 volts internationaux.

Nos piles sont donc bien concordantes avec celles dont se servent les autres physiciens.

En rapprochant les deux valeurs de la pile Clark à 0° en unités électrostatiques et en volts internationaux, on trouve :

1 unité électrostatique = 299,73 volts internationaux;
1 volt international = $3{,}3363 \times 10^{-3}$ unités électrostatiques.

On voit que nos mesures donnent, en unités électrostatiques, la valeur de deux forces électromotrices également bien définies et faciles à retrouver : le Latimer-

(*) T. VIII, p. 201, 1898.

Clark à 0° et le volt international défini au moyen de l'ohm international et de l'équivalent électro-chimique de l'argent. Toute évaluation de l'une ou l'autre de ces quantités en unités électro-magnétiques conduira à une valeur du rapport des unités.

Dans le choix des unités internationales, on s'est attaché à prendre pour chacune d'elles un multiple simple de l'unité électro-magnétique. Si l'on admet, comme moyenne de l'ensemble des mesures électro-magnétiques absolues faites par un très grand nombre de méthodes différentes, que le volt international vaut exactement 10^8 unités électro-magnétiques C. G. S., on aura, d'après ce qui précède :

$$v = 299,73 \times 10^8.$$

D'autre part, M. Limb (*) a mesuré, par une méthode directe, la force électromotrice de la pile Clark à 0° en fonction de l'unité électro-magnétique C. G. S. absolue, et trouvé :

Latimer-Clark à 0° $= 1,4535 \times 10^8$ *unités électro-magnétiques C. G. S.*

En comparant ce nombre avec la valeur de la même pile en unités électrostatiques, on trouve, pour le rapport des unités, la valeur :

$$v = 299,99 \times 10^8.$$

A. Perot et Ch. Fabry.

(*) Limb, Thèse de doctorat.

SUR

UN VOLTMETRE ÉLECTROSTATIQUE INTERFÉRENTIEL

POUR ÉTALONNAGE (*)

Dans un précédent mémoire (**), nous avons décrit un électromètre absolu interférentiel pour petites différences de potentiel, basé sur l'attraction exercée entre deux plateaux parallèles placés à une très faible distance. Cet appareil ne se prête pas à la mesure directe d'une différence de potentiel donnée, car il faut établir entre les deux plateaux une différence de potentiel telle que l'attraction électrique fasse équilibre au poids d'une surcharge, et comparer ensuite le potentiel ainsi obtenu avec celui que l'on veut mesurer.

Sur un principe analogue, nous avons construit un appareil dans lequel on peut, au contraire, mesurer la force attractive produite par une différence de potentiel donnée et, par suite, mesurer directement cette différence de potentiel. Étant transportable et portant avec lui tous ses organes de réglage et de vérification, il permet l'étalonnage sur place des voltmètres d'un tableau. Aucune erreur systématique n'est à craindre dans son emploi, car la constante de l'instrument est indépendante de tout frottement et ne dépend que de

(*) *Journal de Physique*, 3e série, t. VII. 1898, p. 650. Voir ci-dessus, p. 511.

(**) *Annales de Chimie et de Physique*, mars 1898; *Journal de Physique*, 3e série, t. VII, p. 317.

dimensions géométriques parfaitement invariables et de l'élasticité d'un ressort, que l'on peut à chaque instant mesurer, en la comparant au poids d'une surcharge. L'appareil que nous avons construit donne de bonnes mesures entre 20 et 70 volts; on a facilement le dixième de volt. Il serait très facile de le construire pour des voltages plus élevés.

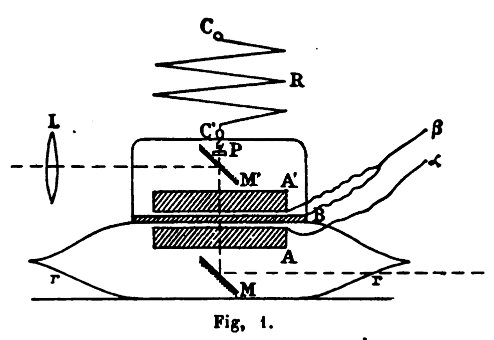


Fig. 1.

La méthode consiste à mesurer l'attraction électrique exercée entre deux plateaux très rapprochés A et B, l'un fixe, l'autre porté par un système de ressorts. Si, entre ces plateaux, on établit une différence de potentiel, les ressorts qui portent la lame mobile fléchissent légèrement. On exerce sur cette lame, au moyen d'un ressort sensible, une force antagoniste suffisante pour la ramener à sa position primitive. Cette force, proportionnelle à l'allongement du ressort, est égale à l'attraction électrique, dont la connaissance permet de calculer la différence de potentiel établie entre les plateaux.

La figure 1 donne le schéma de l'appareil. B est un plateau en verre mince (2 millimètres d'épaisseur), porté par un système de trois forts ressorts, *rr*, fléchissant d'environ 2 millimètres pour une force de

1 kilogramme. Cette lame est comprise entre deux autres lames AA′ fixes et invariablement liées ensemble au moyen de trois cales de verre dont l'épaisseur est légèrement supérieure à celle de la lame B. Ces cales ne gênent en rien les mouvements de B, grâce à la forme des lames de verre. A et A′ (*fig.* 2) sont des triangles équilatéraux égaux superposés; les cales qui les séparent sont placées aux angles. B est un triangle égal aux précédents et tourné de 60° par rapport à ceux-ci.

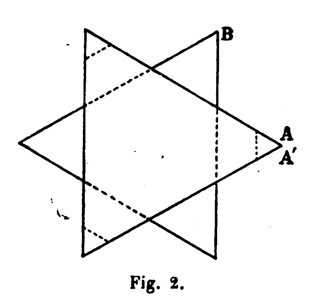


Fig. 2.

Les deux faces de B sont argentées, ainsi que les faces adjacentes de A et A′. On a ainsi deux lames minces à faces argentées, l'une entre A et B, l'autre entre B et A′. Les cales ayant été faites de même verre que la lame B, les dilatations n'altèrent pas d'une façon appréciable la somme des épaisseurs des deux lames d'air.

Tout le système peut être traversé par un faisceau de lumière blanche qui, primitivement horizontal, est reçu à 45° sur le miroir M, traverse normalement les quatre argentures, est enfin reçu par l'observateur, grâce à un second miroir à 45° M′, à travers une loupe L, qui lui permet de voir nettement les objets contenus dans le plan de la lame B. Il n'est pas nécessaire d'employer une lumière très intense, pourvu que les argentures soient minces; une petite lampe à pétrole suffit.

Si les épaisseurs des deux lames minces AB et BA′ sont peu différentes, on voit apparaître le système de

franges de superposition dont nous avons antérieurement donné la théorie (*loc. cit.*). La forme des franges dépend de la forme des surfaces argentées; la frange centrale dessine le lieu des points d'égale épaisseur des deux couches d'air. Dans notre appareil, les faces de A et de B sont planes, et la surface A′ est très légèrement convexe, ce qui donne aux franges la forme de cercles concentriques. Supposons que l'on donne à B une position telle que les anneaux aient un centre blanc, coïncidant avec un repère marqué au centre des lames. On est sûr alors que les surfaces A et B sont parallèles, et que les épaisseurs au centre des deux lames minces sont égales. Tout déplacement vertical de B se traduit par un changement d'aspect des anneaux, qui s'élargissent si cette lame s'élève et se rétrécissent si elle s'abaisse. Il suffit d'un déplacement égal à $\frac{\lambda}{4}$ (environ $0^{\mu},13$) pour que le changement soit d'un anneau complet. Un déplacement de $0^{\mu}01$ est encore parfaitement visible. Ce procédé, dans lequel on se règle sur l'aspect de la plage centrale du système d'anneaux, est à la fois plus sensible et plus commode que celui qui consisterait à prendre comme repère la position d'une frange.

Toutes les fois que les anneaux sont revenus à leur aspect primitif, on est sûr que la lame B est revenue rigoureusement à la même place par rapport aux lames fixes A et A′, et en particulier que la distance qui sépare A et B a repris exactement la même valeur. Cette distance fixe est, dans notre instrument, d'environ $0^{mm},04$.

Toute force exercée sur le plateau B se traduit par un déplacement des franges. Ce plateau, avec les res-

sorts r qui le soutiennent, constitue une balance sensible au demi-centigramme, quoique les ressorts de suspension soient très robustes.

Les plateaux A′ et B sont en relation avec l'une des bornes α de l'instrument, et A avec l'autre borne β. Supposons l'appareil réglé de manière à donner les anneaux centrés à centre blanc. Si entre A et B on établit une différence de potentiel E, il se produit entre ces plateaux une force attractive :

$$F = AE^2.$$

Les ressorts qui soutiennent B fléchissent de quelques microns et les anneaux se rétrécissent ou même disparaissent complètement. On ramène la lame B à sa position primitive en exerçant sur elle une force verticale de bas en haut égale à F, au moyen d'un ressort très sensible R, en forme d'accordéon, dont les tensions sont proportionnelles aux allongements dans les limites de fonctionnement de l'appareil. On tendra ce ressort en déplaçant son point de suspension C, jusqu'à ce que les franges aient repris leur aspect primitif. Soit L l'allongement du ressort. On aura :

$$F = KL = AE^2;$$

d'où :

$$E = \sqrt{\frac{K}{A} l} = B\sqrt{l},$$

B étant une constante.

Une disposition mécanique permet de lire, au lieu de L, une quantité proportionnelle à $\sqrt{l}$, sur une échelle divisée en parties d'égale longueur, ce qui simplifie le calcul et permet des interpolations exactes. Finale-

ment, il y a proportionnalité entre le potentiel de charge E et la lecture n faite sur l'échelle de l'instrument, et l'on peut écrire :

$$E = an.$$

La connaissance de la constante instrumentale a suffi pour effectuer une détermination.

La disposition mécanique employée est basée sur la propriété suivante : soit OB (*fig.* 3) un segment de droite de longueur constante, sur lequel est marqué un point C, et qui peut pivoter autour du point O dans le plan de la figure qui est vertical. Sur la verticale du point O, prenons un point A tel que OA = OB. Soit M la projection de C sur OA. Si la droite OB, primitivement confondue avec OA, tourne autour du point O, le point M s'élève, en même temps que la distance AB augmente. Le déplacement du point M est proportionnel au carré de la longueur AB. Soit, en effet, α l'angle AOB, on a :

Fig. 3.

$$AB = 2OA \sin\frac{\alpha}{2},$$

$$OM = OC\cos\alpha = OC\left(1 - 2\sin^2\frac{\alpha}{2}\right) = OC\left(1 - \frac{1}{2}\frac{\overline{AB}^2}{\overline{OA}^2}\right);$$

d'où :

$$OC - OM = \frac{1}{2}\frac{OC}{\overline{OA}^2} \times \overline{AB}^2.$$

OC — OM représente le déplacement vertical du point M, compté à partir de sa position initiale. OA et OC étant des longueurs constantes, on voit que le déplacement est proportionnel au carré de AB. Il suffit donc, pour arriver au résultat voulu, de faire

porter l'extrémité mobile du ressort par une pièce liée à la droite MC, susceptible de se déplacer seulement dans le sens vertical, et de lire la longueur AB sur une échelle mobile autour du point A et dont le zéro soit en ce point.

La figure 4 montre comment ce principe a été réalisé. Le mouvement de la bielle OB est obtenu au moyen d'un bouton, qui actionne un pignon mobile sur un secteur denté. Un cadre mobile verticalement entre deux glissières porte une traverse horizontale qui figure la droite MC, et qui repose sur un galet dont le centre est le point C de la bielle. Celle-ci entraîne, d'autre part, un curseur qui se déplace sur l'échelle AB, divisée en millimètres. Il suffit de multiplier le nombre n de millimètres lu sur l'échelle par la constante a pour avoir le nombre de volts.

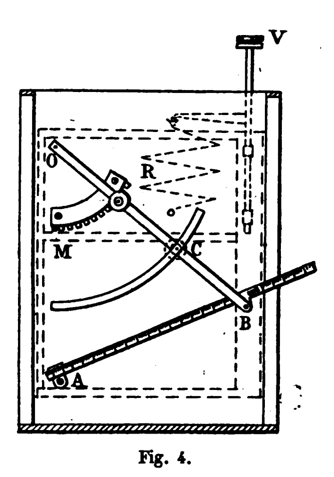


Fig. 4.

Extérieurement, l'appareil a la forme d'un prisme triangulaire dont une face entièrement vitrée sert à l'introduction du faisceau lumineux; une autre face porte la loupe, et la troisième, constituée par une plaque de laiton, porte l'échelle divisée et la disposition mécanique que l'on vient de décrire. La figure 5 donne une coupe de l'appareil par un plan vertical passant par une hauteur du triangle de base.

Tare du ressort. — La constante a dépend :

1° De l'aire de la partie commune aux deux trian-

gles équilatéraux A et B (*fig.* 2); cette surface est invariable;

2° De l'épaisseur de la lame d'air qui les sépare, et qui est aussi, comme on l'a vu, toujours ramenée à une valeur parfaitement constante;

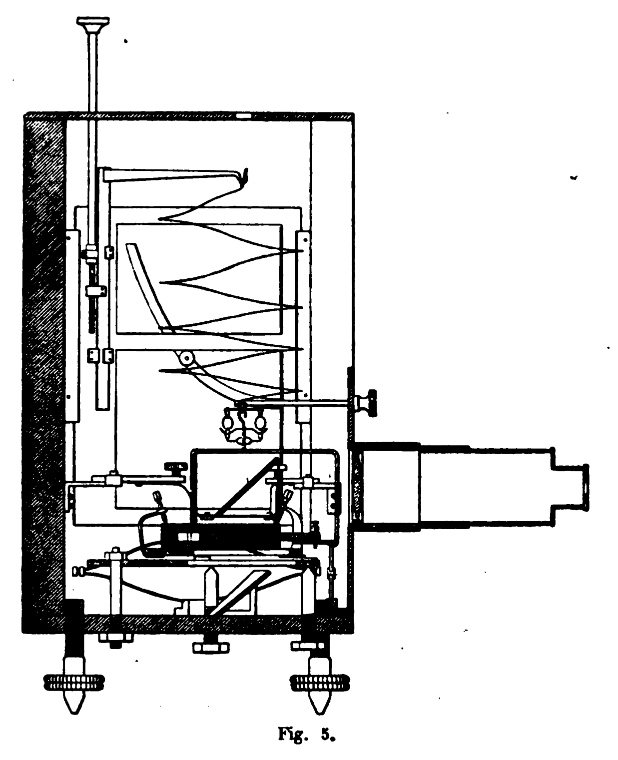


Fig. 5.

3° De l'élasticité du ressort de compensation R. Celle-ci est sujette à varier et a besoin d'être mesurée de temps en temps; à cet effet, nous avons disposé un poids de platine P (*fig.* 1) suspendu à deux anneaux et susceptible d'être déposé sur le support de la lame mobile au moyen d'un bouton placé extérieu-

rement. L'appareil étant réglé poids levé, on dépose le poids et on ramène, en tendant le ressort R, le centre des anneaux à être blanc. Le nombre N lu sur l'échelle permet de calculer la valeur de la constante instrumentale au moment de l'expérience. Le constructeur a déterminé une fois pour toutes le nombre de volts nécessaires pour produire une force attractive égale au poids de la surcharge. Soit E, ce voltage qui est invariable, car il dépend seulement de la surface des plateaux et de leur distance, et non de l'élasticité du ressort. On sait alors que N divisions correspondent à E volts, et, comme il y a proportionnalité entre les lectures et les voltages, la valeur actuelle de la constante a est :

$$a = \frac{E}{N}.$$

On remarquera que, si l'on a eu soin de déterminer la masse m de la surcharge, les forces attractives se trouvent mesurées, grâce à cette tare, en valeur absolue; la force correspondant à la lecture n est :

$$F = \frac{mg}{N} n \text{ dynes.}$$

L'appareil serait un électromètre absolu, si l'on pouvait calculer la force attractive produite par une différence de potentiel connue, ce qui ne serait guère possible avec la forme de plateaux que nous avons adoptée. D'ailleurs, notre but n'étant pas de construire un appareil absolu, il suffit de mesurer une fois pour toutes le voltage E nécessaire pour équilibrer le poids de la surcharge, ce que nous faisons au moyen d'une batterie d'éléments Latimer-Clark. Il n'est utile de connaître ni les dimensions exactes de l'appareil, ni

le poids de la surcharge, qui doit seulement rester invariable.

Dans notre appareil, la surface commune aux deux plateaux est d'environ 18 centimètres carrés; leur distance, lorsque l'appareil est réglé (anneaux centrés, avec centre blanc), $0^{mm},04$. La surcharge de platine pèse $1^{gr},25$. Il faut une différence de potentiel de $51^{volts},40$ pour produire une force attractive égale à son poids. Chaque millimètre de l'échelle équivaut à $0^{volt},4$ environ. L'appareil permet de bonnes mesures, exactes à $0^{volt},1$ au moins, entre 70 et 20 volts. Au-dessous de cette limite, la force attractive est trop faible ($0^{gr},2$ pour 20 volts). Elle est de $2^{gr},4$ pour 70 volts ; le ressort ne permet pas de mesurer des forces plus grandes, et d'ailleurs l'équilibre ne tarderait pas à devenir instable. Il serait très facile de construire des appareils propres à mesurer des voltages plus élevés, en employant des ressorts plus forts, tant pour suspendre la lame B que pour faire équilibre à la force électrique. On remarquera que notre appareil met en jeu des forces relativement grandes, grâce à la petitesse de la distance qui sépare les plateaux.

Mode opératoire. — Il faut, avant tout, régler l'appareil de telle façon que, lorsqu'il est déchargé, les anneaux soient à centre blanc, centrés sur le repère qui marque le centre des lames. L'ensemble des deux lames A,A', est porté sur une pièce métallique triangulaire munie de trois tiges à écrous et déformables à l'aide de trois vis à pression. A l'aide de ces tiges de vis de pression, on peut à volonté déformer légèrement la plaque triangulaire et, par suite, régler la position du système A,A' par rapport à la lame B. Pendant ce

réglage, le curseur qui se déplace sur la règle divisée doit rester au zéro. Il est commode de l'achever en se servant du ressort R, ce qui doit se faire sans que le curseur quitte le zéro. La tension du ressort est alors produite par une vis supplémentaire V (*fig.* 4), qui tend le ressort sans déplacer le curseur. On agira sur cette vis jusqu'à ce que le blanc apparaisse au centre du système d'anneaux. L'appareil est alors réglé.

Pour faire une mesure, on établit entre les bornes la différence de potentiel à mesurer; la lame B se rapproche de A, et les anneaux se rétrécissent ou même disparaissent complètement, si la différence de potentiel est un peu forte. On agit, au moyen du pignon denté, sur le ressort R, jusqu'à ce que les anneaux aient reparu avec leur centre blanc. On lit le nombre de divisions n sur la règle divisée, et le produit de ce nombre par la constante a donne le nombre de volts. La valeur de cette constante peut être immédiatement contrôlée par la méthode indiquée plus haut.

L'appareil une fois réglé présente une grande stabilité. Il arrive néanmoins que, par suite des dilatations des pièces de métal, la lame B n'occupe plus la position médiane entre A et A′ et que, par suite, les anneaux disparaissent. Soit en déposant la surcharge, soit en tendant le ressort, on arrivera généralement à faire apparaître un système de franges plus ou moins serrées; on les élargira et on les centrera au besoin sur le repère, à l'aide des vis de réglage, opération facile.

Dans le cas où l'appareil serait entièrement déréglé, on pourra se servir des images par réflexions multiples; si l'on regarde à travers les argentures le fila-

ment d'une lampe à incandescence, et que les surfaces argentées ne soient pas exactement parallèles, on voit le filament accompagné d'une série d'images produites par réflexion sur les surfaces argentées; on amènera toutes ces images à se confondre avec le filament lui-même en agissant sur les vis de réglage. On pourra également s'aider des anneaux observés en lumière monochromatique du sodium; on élargira, et l'on centrera ces anneaux. Il suffit alors d'agir de quantités égales sur les trois vis de butée pour voir apparaître les anneaux en lumière blanche.

Il faut remarquer que l'on obtient des franges en lumière blanche non seulement lorsque les deux intervalles AB, A'B sont égaux, mais aussi lorsque leur rapport est une fraction simple, 1/2 par exemple. La distance AB se trouve alors avoir une valeur très différente de sa valeur normale. Si, par hasard, on tombait sur un de ces systèmes de franges, et qu'on ne s'en aperçût pas par le manque d'éclat des colorations ou par le serrage des anneaux, on en serait averti à la première mesure par l'absurdité des résultats obtenus. Enfin il est nécessaire que la ligne des deux crochets CC' du ressort (*fig.* 1) soit parallèle au déplacement du crochet C; pour vérifier ce fait, on place l'appareil vertical à l'aide d'un fil à plomb; puis, enlevant le bouchon qui ferme une ouverture percée dans le couvercle de l'appareil, on fait passer le fil à plomb à l'intérieur, et l'on vérifie que la ligne des crochets est verticale.

Résultats. — Voici, pour mémoire, les résultats d'une série de mesures faites sur une batterie de piles-étalons :

Constante de l'instrument : 1 millimètre vaut 0,3865 volts.

E vrai.	E mesuré.
14,29	14,72
28,59	28,60
42,88	42,82
57,18	57,20
71,47	71,50

On voit qu'à partir de 30 volts on peut compter largement sur le dixième de volt.

L'instrument est convenable pour les courants alternatifs; sa capacité étant $3{,}8 . 10^{-10}$ farads, le facteur par lequel il faut multiplier la lecture faite sur une force électromotrice alternative de fréquence 60 est

$$1{,}000\,000\,26,$$

pratiquement l'unité.

A. Pérot et Ch. Fabry.

SUR LES ÉCRANS ÉLECTROMAGNÉTIQUES (*)

On sait depuis longtemps que les conducteurs creux protègent plus ou moins complètement un point intérieur contre les actions électromagnétiques variables; il a été fait à ce sujet de nombreuses expériences qualitatives; mais l'étude quantitative du phénomène est délicate, de sorte qu'on a rarement cherché à préciser ces variations (**).

Au point de vue théorique, les équations générales du problème ont été posées par Maxwell; leur solution est complexe dans le cas général; lorsqu'on a affaire à des actions très rapidement variables, on peut la simplifier, les résultats obtenus restant cependant suffisamment approchés (***); je rappellerai les expériences faites relativement à cette question au moyen des oscillations hertziennes; des corps peu conducteurs comme les solutions salines, qui constituent des écrans pratiquement nuls pour les fréquences usuelles, exercent dans ce cas une protection notable; les métaux deviennent des écrans à peu près parfaits sous une épaisseur très faible.

Je me suis proposé d'étudier expérimentalement des écrans conducteurs ayant la forme de cylindres creux,

(*) *Journal de Physique*, 3e série, t. VII, 1898, p. 275.

(**) Hughes, *C. R.*, t. LVIII, p. 122; 1879; — Villoughby Smith, *Journ. of the soc. of tel. eng. and el.*, t. XII, p. 457; 1884.

(***) Consulter relativement à cette théorie : Mascart et Joubert, *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, 2e édit., t. I, Paris, Masson; 1896: — H. Poincaré, *Les oscillations électriques*, Paris, Carré; 1894; — J.-J. Thomson, *Recent Researches in El. and Magn.*, Oxford; 1893.

soumis à des actions électromagnétiques dont la fréquence est celle des courants alternatifs usuels; la forme simple des écrans permet de soumettre leur action protectrice au calcul, dans le cas où ils sont d'un métal non magnétique. On peut ainsi comparer les résultats de l'expérience avec ceux de la théorie.

1° ÉCRANS NON MAGNÉTIQUES

Disposition des expériences. — Les écrans étudiés sont des cylindres ayant 22 centimètres de hauteur, un diamètre extérieur très voisin de $5^{cm},6$ et des épaisseurs variables. Une bobine parcourue par un courant alternatif sensiblement sinusoïdal produit ainsi un champ alternatif; lorsqu'un des cylindres-écrans est placé concentriquement à la bobine, l'amplitude du champ est réduite pour un point intérieur; le rapport des amplitudes du champ, sur l'axe de la bobine, avec et sans cylindre, caractérise l'action protectrice de celui-ci.

Pour connaître ce rapport, on place concentriquement à la bobine inductrice une bobine beaucoup plus petite; elle est le siège d'un courant induit dont l'intensité moyenne est proportionnelle à l'amplitude du champ, dans l'hypothèse d'une variation sinusoïdale. Cette intensité est mesurée par la racine carrée de la déviation d'une sorte d'électrodynamomètre très sensible. Si δ et δ' sont les déviations de l'instrument en l'absence d'écran et avec écran, la quantité $\sqrt{\frac{\delta'}{\delta}}$ est le rapport cherché.

L'intensité efficace du courant primaire était mesurée au moyen de la méthode électrométrique de

M. Joubert et maintenue naturellement constante pendant la durée d'une expérience complète. L'appareil servant à mesurer l'intensité du courant secondaire était simplement constitué par un galvanomètre de Nobili dont l'aiguille avait été remplacée par un petit barreau de fer doux. Des expériences préalables ont été faites pour étudier la forme du courant alternatif employé et les indications de l'appareil de mesure; elles sont exposées dans un mémoire plus étendu publié dans les *Annales de chimie et de physique*.

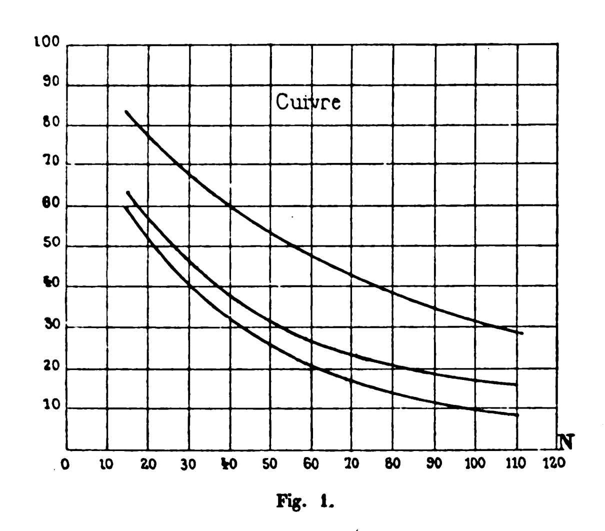


Fig. 1.

Résultats. — Dans le cas de conducteurs non magnétiques, la seule influence à étudier est celle de la fréquence, le mode de répartition des courants induits ne dépendant nullement de l'amplitude. Les expériences ont porté sur des cylindres de cuivre (épaisseurs : $5^{mm},9$, $13^{mm},3$ et $21^{mm},1$), de laiton ($2^{mm},75$, $7^{mm},72$ et $14^{mm},1$), de plomb ($7^{mm},3$ et $13^{mm}9$) et d'un

alliage zinc-cuivre contenant seulement quelques centièmes de zinc (8 et 14 millimètres).

L'action protectrice d'un cylindre déterminé croît naturellement avec la fréquence, de sorte que le rapport $\sqrt{\frac{\delta'}{\delta}}$ diminue ; c'est ce rapport qui est porté en ordonnées dans les courbes des *fig.* 1, 2 et 3, la fréquence étant portée en abscisses. Chacune des courbes correspond à l'un des cylindres employés.

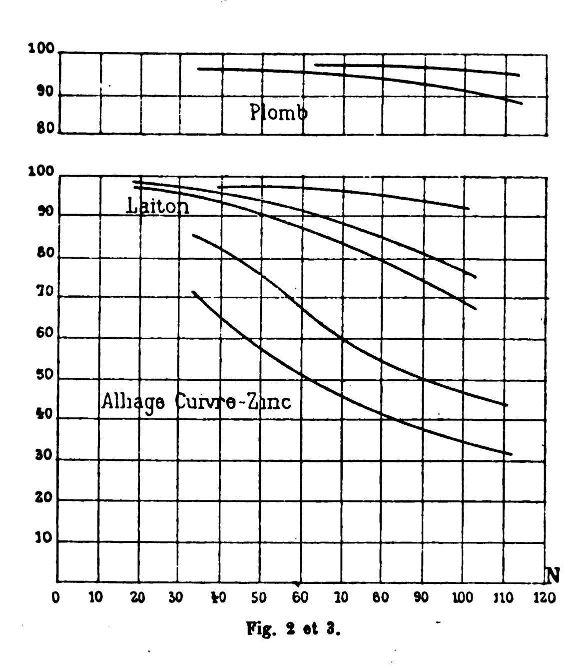


Fig. 2 et 3.

Pour le cuivre, bon conducteur, la courbe s'abaisse rapidement ; pour les métaux moins conducteurs, la variation est beaucoup plus lente ; on voit, de plus, que le caractère des courbes change, celles qui sont relatives aux écrans de cuivre tournant leur convexité

vers l'axe des x, et celles relatives aux écrans de laiton et de plomb tournant, au contraire, leur concavité dans cette direction. La courbe relative à l'un des cylindres de l'alliage zinc-cuivre, dont la conductivité est comprise entre celles du cuivre et du laiton, a une forme intermédiaire et présente un point d'inflexion.

Comparaison avec la théorie. — J'indiquerai seulement ici le principe du calcul, dont on pourra trouver le détail dans le mémoire indiqué.

Si on représente le champ magnétique en un point d'un conducteur homogène et isotrope, ayant la forme d'un cylindre de révolution, par l'écriture

$$H = \varphi \cdot e^{i\omega t},$$

l'amplitude φ satisfait à la relation

$$\frac{d^2\varphi}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{d\varphi}{d\rho} = mi\varphi,$$

dans laquelle ρ représente la distance du point considéré à l'axe de révolution, et m l'expression $4\pi\mu c\omega$, en désignant par μ la perméabilité magnétique supposée constante et par c la conductivité.

L'intégrale générale de cette équation est une expression assez complexe qui renferme les fonctions de Bessel; cette expression représentant l'amplitude du champ H, il suffira d'en calculer les valeurs pour un point de la surface extérieure et un point de la surface intérieure du cylindre-écran; le rapport de ces deux valeurs sera celui des amplitudes des champs intérieur et extérieur, c'est-à-dire représentera le rapport qui était déterminé dans les expériences précédentes.

Le calcul, qui paraît très laborieux au premier abord, est simplifié par ce fait que, pour les valeurs correspondant aux cylindres employés ici, les termes des fonctions de Bessel deviennent très rapidement négligeables. Des tables publiées par lord Kelvin donnent les valeurs de la première de ces fonctions (*). J'ai calculé les valeurs des termes des autres fonctions dont il était besoin ici.

On peut résumer de la façon suivante les résultats obtenus :

1° Les résultats dans leur ensemble sont bien conformes à ceux de l'expérience. Les formes différentes obtenues pour les diverses courbes proviennent de ce que les expériences n'embrassent qu'une région limitée de chacune d'elles. Chaque courbe a un point d'inflexion qui est très rapproché de *oy* et en deçà des limites des expériences pour les écrans de cuivre, tandis qu'il est au delà pour les écrans de laiton et de plomb;

2° On obtient dans la plupart des cas des renseignements suffisamment précis en effectuant le calcul non plus au moyen de l'intégrale générale de l'équation précédente, mais en prenant seulement comme expression de φ la fonction de Bessel d'ordre 0, qui est une solution particulière de cette équation, et dont le calcul est beaucoup plus simple que celui de l'intégrale générale.

2° ÉCRANS MAGNÉTIQUES

L'étude des écrans formés d'un métal magnétique est beaucoup plus complexe à cause de la variation,

(*) Sir W. Thomson, *Math. and Phys. papers*, t. III, p. 491; — Mascart et Joubert, *loc. cit.*, p. 718.

avec l'intensité du champ, de la perméabilité magnétique; cette perméabilité intervient, comme nous l'avons vu, dans les équations fondamentales, qu'on ne peut plus alors résoudre; on peut cependant prévoir en gros le mode d'action de ces écrans :

A conductivité égale, un conducteur magnétique sera meilleur écran qu'un conducteur non magnétique, parce que, le flux d'induction étant plus grand dans le premier, les courants induits y seront plus intenses.

Voyons maintenant l'influence de l'intensité du champ. La perméabilité μ croît d'abord rapidement avec le champ, passe par un maximum et décroît ensuite de plus en plus lentement; si donc l'amplitude A du champ alternatif est très faible, on se trouvera dans la première région, où μ croît avec le champ; à fréquence constante, la protection exercée par l'écran augmentera donc d'abord avec A. Si au contraire l'amplitude A est très grande, la plus grande partie de la variation du champ correspondra à la région où μ diminue, c'est-à-dire qu'alors la protection diminuera, si on fait croître A. Il en résulte que si on fait croitre A d'une façon continue, la fréquence restant constante, la protection augmentera d'abord, passera par un maximum et décroîtra ensuite; en somme, ses variations seront les mêmes que celles de la perméabilité, mais beaucoup moins marquées. J'ai en effet observé une telle variation, et les courbes représentant en fonction de A ou le rapport $\sqrt{\frac{\delta'}{\delta}}$ ont la forme représentée dans la *fig.* 4.

J'ai fait d'ailleurs une autre série d'expériences dans lesquelles les variations de la protection suivaient d'une manière beaucoup plus nette celles de la

perméabilité; il suffisait pour cela de superposer un faible champ alternatif, maintenu fixe, et un champ constant dont on faisait croître progressivement l'intensité; on obtenait ce résultat en faisant passer dans une des couches de la bobine magnétisante un courant alternatif, et dans les autres couches un courant continu; en faisant varier l'intensité de ce courant et par suite la valeur moyenne du champ résultant, on peut placer les variations du champ dans telle région qu'on le veut de la courbe de perméabilité.

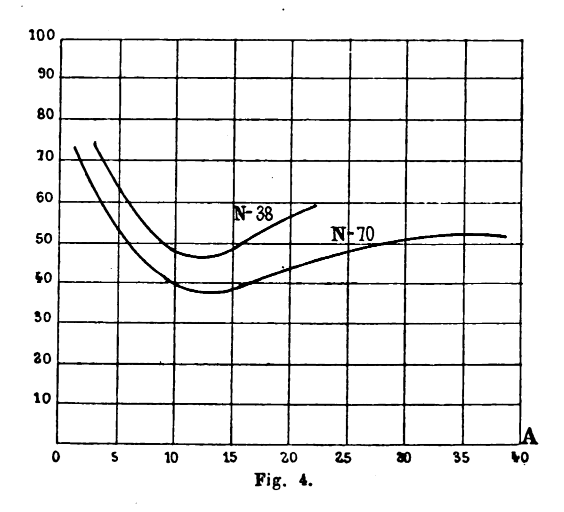


Fig. 4.

Enfin, à intensité constante, la protection augmentera évidemment avec la fréquence.

Dispositions des expériences. — Les expériences ne peuvent être disposées comme celles relatives aux écrans non magnétiques, à cause de l'influence perturbatrice de l'aimantation induite, qui, pour des cylindres courts comme ceux employés précédem-

ment, altérerait d'une façon très considérable le champ intérieur. On peut supprimer cette influence en opérant avec un écran annulaire en forme de tore, ou encore la diminuer en employant un cylindre suffisamment allongé. J'ai utilisé dans le cas du fer ces deux dispositions, mais, dans la seconde, l'influence du champ démagnétisant était encore considérable.

Les expériences faites avec le tore étaient divisées en deux parties, dans chacune desquelles on employait la même bobine secondaire; dans la première partie, cette bobine était placée à l'intérieur du tore creux recouvert lui-même d'une bobine magnétisante; dans la deuxième, elle était contenue à l'intérieur d'une nouvelle bobine aussi identique que possible à la précédente, mais sans interposition de fer.

Le tore, de 1 millimètre d'épaisseur, était formé de deux morceaux symétriques par rapport à un plan passant par l'axe de révolution; la bobine secondaire était enroulée sur un noyau de caoutchouc, de sorte qu'on pouvait la glisser dans les deux morceaux du tore; ceux-ci, rapprochés au contact, furent soudés; deux petits trous avaient été ménagés pour laisser passer les fils de la bobine secondaire, qui occupait toute la cavité intérieure.

Trois séries d'expériences furent faites; dans les deux premières on opéra à fréquence constante (38 et 70) et à intensité variable; les résultats obtenus sont résumés par les courbes de la *fig.* 4 où on a porté en ordonnées les valeurs du rapport $\sqrt{\frac{\delta'}{\delta}}$ et en abscisses les valeurs de l'amplitude A du champ alternatif; dans la troisième on maintint au contraire l'intensité constante et on fit varier la fréquence N (*fig.* 5). Les

résultats sont bien ceux qu'on pouvait prévoir. On peut remarquer que la variation avec la fréquence, à intensité constante, présente un caractère un peu différent de celui que nous avions rencontré pour les écrans de cuivre : la variation, d'abord très rapide, devient de plus en plus lente; cette modification s'explique facilement par la variation même de la perméabilité, conséquence de la diminution du champ à l'intérieur de la masse du fer, sous l'action protectrice des courants induits.

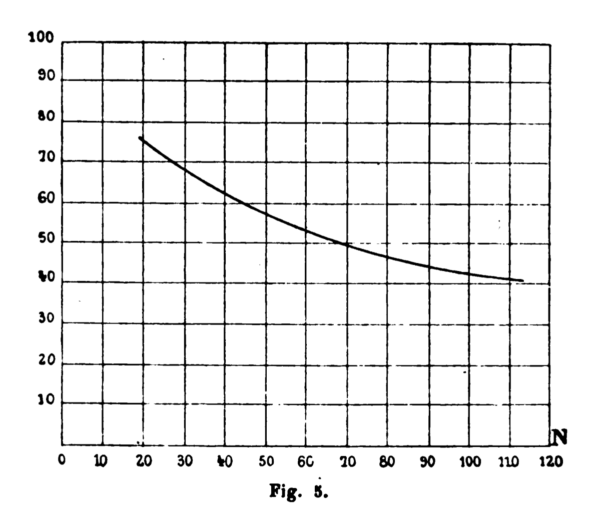


Fig. 5.

Je n'insisterai pas ici sur les résultats obtenus au moyen de cylindres allongés (1^{m},20 de longueur, 3^{cm},6 de diamètre extérieur); ils sont analogues aux précédents; d'ailleurs, l'influence de l'aimantation induite se faisait ici sentir, de sorte que le phénomène observé n'est pas dû seulement à l'influence protectrice des courants induits. Je me suis servi de cette deuxième disposition, beaucoup plus commode que la

précédente, pour étudier l'influence de la région de la courbe de perméabilité dans laquelle on peut localiser les variations du champ, comme je l'ai dit plus

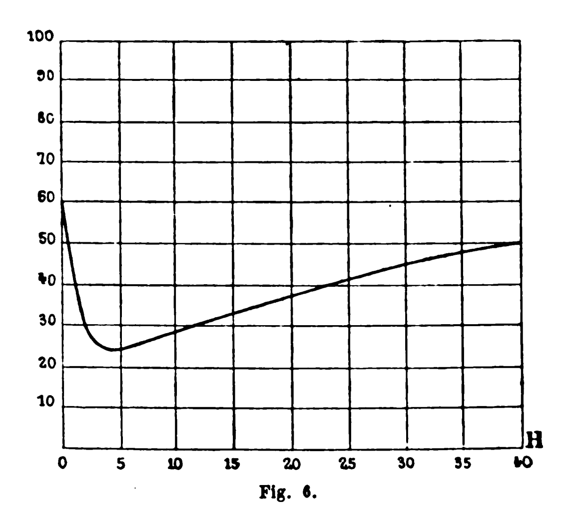


Fig. 6.

haut. En portant en abscisses les valeurs du champ constant et en ordonnées celles du rapport $\sqrt{\frac{\delta'}{\delta}}$, on obtient la courbe de la *fig.* 6, où l'influence de la perméabilité se manifeste nettement.

Ch. Maurain.

L'Éditeur-Gérant : Vve Ch. Dunod.

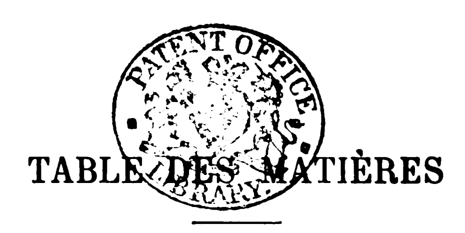


TABLE DES MATIÈRES

TOME XXIV. — ANNÉE 1898

Numéro de Janvier-Février.

Numéro de Mars-Avril.

Numéro de Mai-Juin.

Numéro de Juillet-Août.

Numéro de Septembre-Octobre.

Numéro de Novembre-Décembre.

TABLE ALPHABÉTIQUE ET SIGNALÉTIQUE

DES MATIÈRES

TOME XXIV. — ANNÉE 1898

D

E

L

M

N

O

P

R

S

T

24-4-99

FIN DES TABLES

39.568. — Imprimerie LAHURE, 9, rue de Fleurus, à Paris.

